5
Resultados e Discussão - Caso 1

Nesse capítulo são apresentados e confrontados os resultados obtidos experimental e numericamente do caso 1, onde um fluido não newtoniano desloca um newtoniano. Os resultados são apresentados na forma de imagens obtidas com a câmera CCD (experimental), e dos contornos de fases (numérico) da interface entre os fluidos no processo de deslocamento, na posição axial fixa, x=1,6 m. As imagens para cada uma das quatro velocidades praticadas foram divididas em três itens, por excentricidade.

5.1
$\chi = 0$ - Excentricidade Máxima

Nas figuras (5.1) a (5.4) vemos as comparações da ponta da interface na situação de excentricidade máxima. Das visualizações experimentais da forma da interface entre os fluidos, pode-se observar que o efeito do aumento da vazão, sobre a interface, é de um crescente afinamento da mesma. Conseqüentemente, a espessura da massa de fluido deslocado residual em contato com a parede do tubo externo aumenta com a vazão. As imagens obtidas numericamente, mostraram o encurvamento da interface e o aumento de massa na parede. No entanto as interfaces observadas experimentalmente e as obtidas através da solução numérica das equações governantes diferem no que tange à curvatura.

Vale lembrar que a comparação experimental-numérica não é absolutamente justa porque não foi possível criar um plano axial no experimento (e.g. a partir de um laser) igual àquele disponível no pós-processamento dos resultados numéricos. A imagem experimental mostra apenas a projeção da superfície da interface, enquanto que a imagem obtida numericamente representa o contorno da interface em um plano que passa pelo eixo do duto e divide seu interior em duas partes simétricas.

5.2 χ = 0,5 - Excentricidade Média

Para o caso da excentricidade $\chi = 0{,}5$, vemos nas figuras (5.5) a (5.8) que o escoamento ainda se dá, preferencialmente pela região mais larga do anular, e, conforme a vazão aumenta, a interface vai ficando para trás na região mais estreita. O encurvamento da interface continua ocorrendo com aumento da vazão, como no caso anterior com $\chi = 0$.

Os resultados numéricos, previram este encurvamento da interface com a vazão, mas no entanto apresentaram uma diferença muito maior entre as velocidades da interface nas regiões mais estreitas e mais espaçadas. Uma prova disso é que não foi observado nenhum sinal do fluido deslocador na região mais estreita do anular, para nenhuma vazão nos resultados da simulação numérica. Já no experimento, na menor vazão, havia uma grande quantidade de fluido deslocador na região mais estreita do anular. Até mesmo na maior vazão, havia uma pequena quantidade. Além disso, a imagem com menor vazão, na simulação numérica, apresentou uma interface demasiadamente pontiaguda. O percentual de fluido deslocado em contato com a parede também aumenta à medida que cresce a velocidade.

5.3 χ = 1 - Sem Excentricidade

Na situação de cilindros concêntricos, figuras (5.9) a (5.12), o experimento novamente apresentou a tendência de encurvamento da interface entre os fluidos com o aumento da vazão. A ponta da interface se torna continuamente mais acentuada o que sugere uma penetração do fluido deslocador através do deslocado. Numa primeira instância, esse efeito sugere um mau deslocamento, uma vez que uma interface pontiaguda caracteriza um processo de deslocamento ineficiente. Por outro lado, interfaces mais planas se aproximam de uma configuração de um pistão, deslocador ideal, situação que foi observada sob baixas vazões.

Um ponto relevante da comparação experimental-numérica é o efeito de encurvamento, ou seja, na solução numérica vemos interfaces mais pontiagudas do que as observadas experimentalmente. Praticamente não houve alteração da mesma com o aumento da velocidade. É possível atribuir esse resultado a imprecisões do próprio método multi-fásico *VOF*, que apresenta problemas de convergência à medida que a interface se encurva. Como o método resolve uma equação de continuidade para a fração volumétrica de cada fase, problemas de processamento podem acontecer uma vez que mais células possuem a superfície de contorno (interface).

Nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15 são apresentados gráficos que mostram o percentual de fluido deslocador no interior do domínio computacional em função do tempo adimensional t^*, proposto por Tehrani em (1992) [30], definido como o número de volumes bombeados dividido pelo volume interno do domínio, ou seja:

$$t^* = \frac{Qt}{V} = \frac{\bar{v}At}{AL} = \frac{\bar{v}t}{L} \tag{5-1}$$

Analisando os gráficos das eficiências de deslocamento obtidos numericamente, pode-se dizer que os casos estudados apresentaram todos bons rendimentos na substituição, sobretudo quando eram empregadas baixas velocidades. Uma vez que o fluido deslocador é não newtoniano, com viscosidade maior que a do deslocado, sob baixas velocidades sua viscosidade aumenta, implicando uma maior razão de viscosidade ($\eta_{deslocador}/\mu_{deslocado}$), o que favorece o processo. Experimentalmente esse efeito também foi observado. Para baixas velocidades tivemos um deslocamento similar ao de um pistão; já com o aumento da velocidade houve uma perda de eficiência causado pela invasão do fluido deslocador no deslocado.

Podemos ver nos gráficos que, para todas as excentricidades, na vazão mais baixa de 1 BPM o percentual de fluidos substituído, após um volume interno bombeado, $t^* = 1$, é de aproximandamente 95%. No caso de um pistão perfeito esse valor seria, obviamente, 100%. O caso com $\chi = 0{,}5$ apresentou uma eficiência que pouco depende da vazão. Nos casos $\chi = 0$ e $\chi = 1$ a eficiência cai com o aumento de vazão para 87% quando $t^* = 1$. O caso $\chi = 1$ se mostrou mais ineficaz, pois se esperava que quanto maior a excentricidade, pior fosse a eficiência de deslocamento. Esse comportamento surpreendente pode ser explicado pela acentuada interface gerada na simulação numérica, não encontrada experimentalmente. Após aproximadamente $t^* = 1,75$, em todos os casos se vê uma assintotização para 100% de substituição.

Foram plotados também gráficos do percentual de fluido deslocado também em função do tempo adimensional t^* na superfície de contorno de saída, figuras 5.16, 5.18 e 5.20. Esse gráfico também é capaz de mostrar a eficiência de deslocamento visto pela mistura produzida pelo processo de deslocamento. Nas figuras 5.17, 5.19 e 5.21 vemos, ainda, cortes na seção de saída mostrando em amarelo o fluido deslocado e em vermelho o fluido deslocador nos seguintes instantes de tempo $t^* = 0,6$; $t^* = 1,1$ e $t^* = 2$, para uma vazão de 4 BPM.

Analisando esses gráficos, vemos mais uma vez que os testes praticados a baixas velocidades promovem melhores substituições dado que existe uma queda brusca no instante t^*=0,9 de 100% para 15% em todas as excentricidades. Aumentando a vazão é necessário algum instante a mais de bombeio para que o fluido deslocador seja o único fluido a cruzar a fronteira de saída. Nas imagens dos cortes, nos casos em que há excentricidade, o escoamento se dá preferencialmente pela região mais larga do anular. Vemos ainda que, comprovando os dados dos gráficos, no instante de tempo $t^* = 2$ o percentual de fluido deslocado é muito pequeno.

Figura 5.1: Caso 1 – $\chi = 0 - 1$ BPM

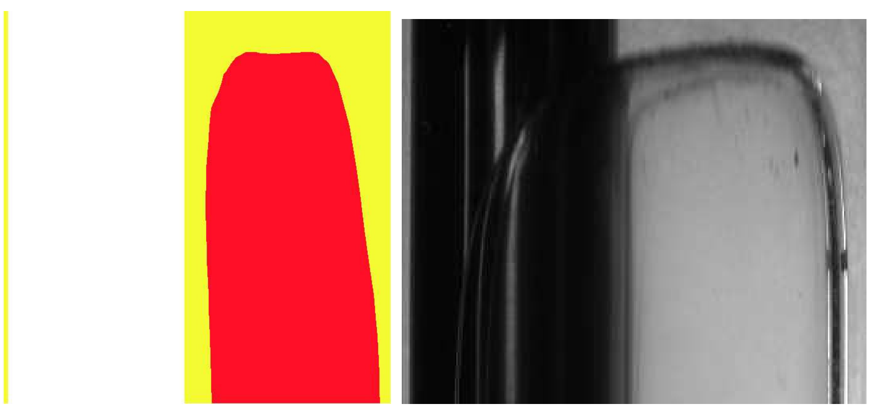

Figura 5.2: Caso 1 – $\chi = 0 - 2$ BPM

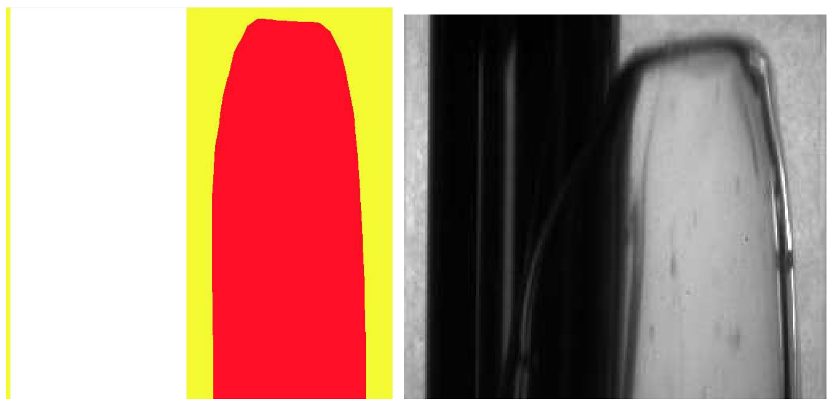

Figura 5.3: Caso 1 – $\chi = 0 - 3$ BPM

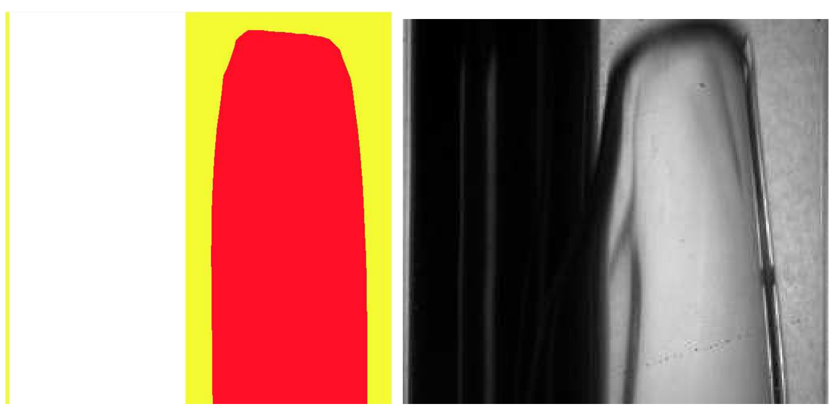

Figura 5.4: Caso 1 – $\chi = 0 - 4$ BPM

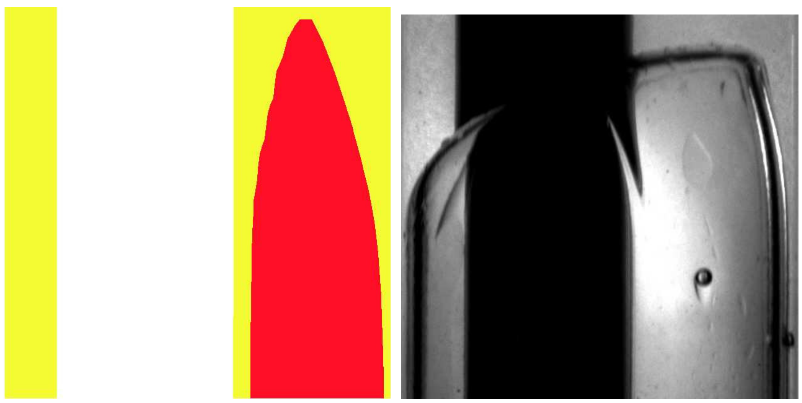

Figura 5.5: Caso 1 – χ = 0,5 – 1 BPM

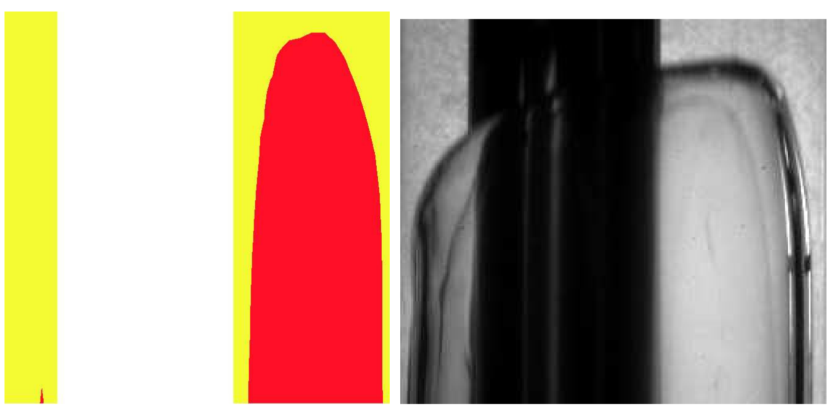

Figura 5.6: Caso 1 – χ = 0,5 – 2 BPM

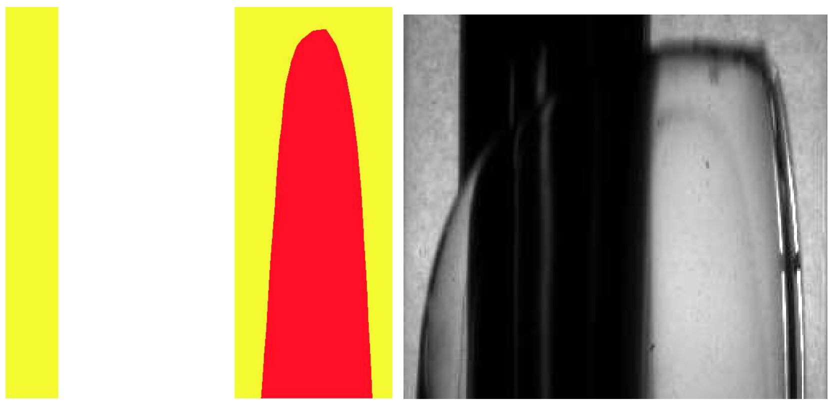

Figura 5.7: Caso 1 – χ = 0,5 – 3 BPM

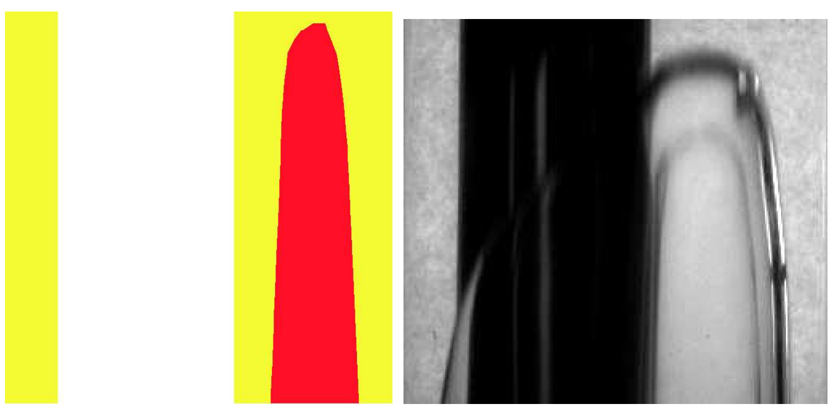

Figura 5.8: Caso 1 – χ = 0.5 – 4 BPM

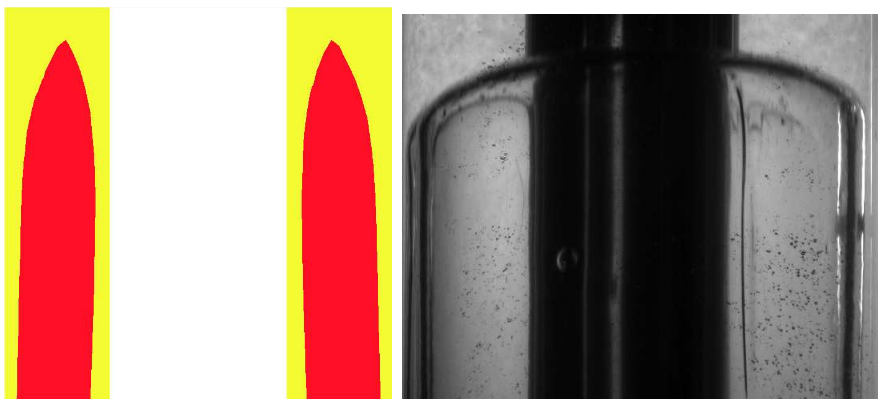

Figura 5.9: Caso 1 – $\chi = 1$ – 1 BPM

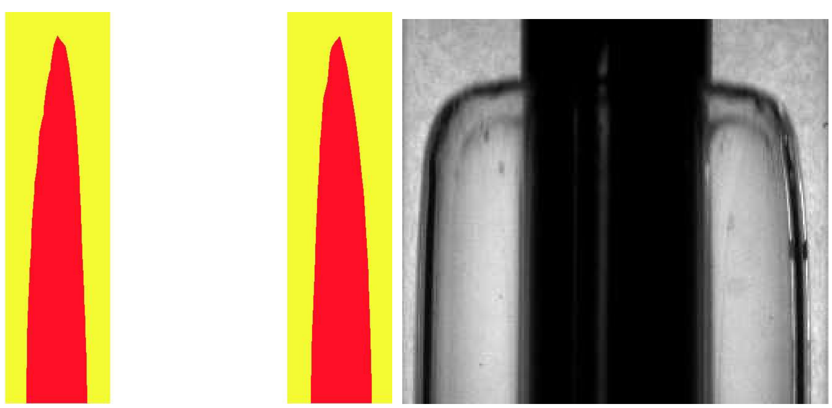

Figura 5.10: Caso 1 – $\chi = 1$ – 2 BPM

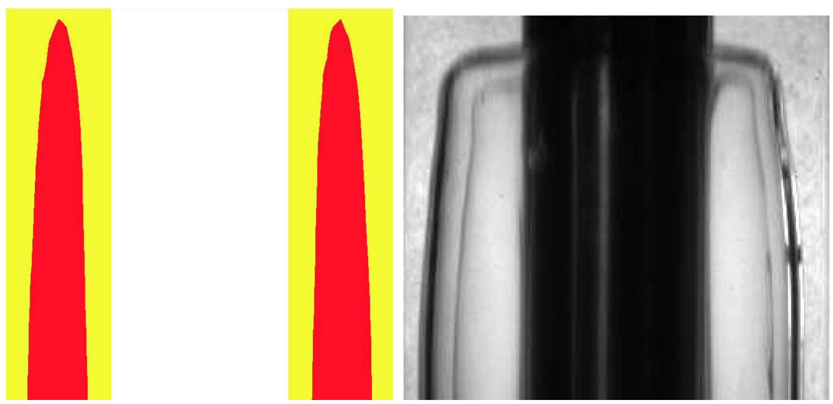

Figura 5.11: Caso 1 – $\chi = 1$ – 3 BPM

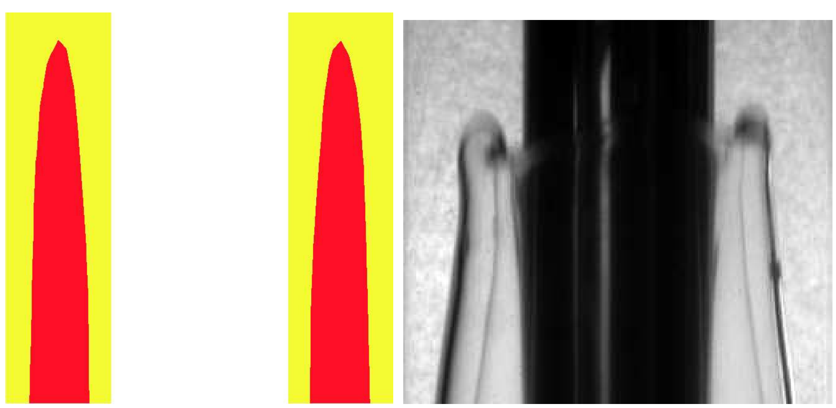

Figura 5.12: Caso 1 – $\chi = 1$ – 4 BPM

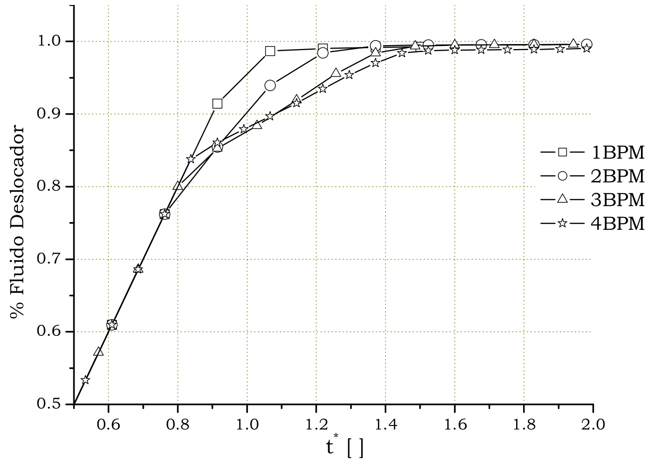

Figura 5.13: Eficiência – $\chi = 0$

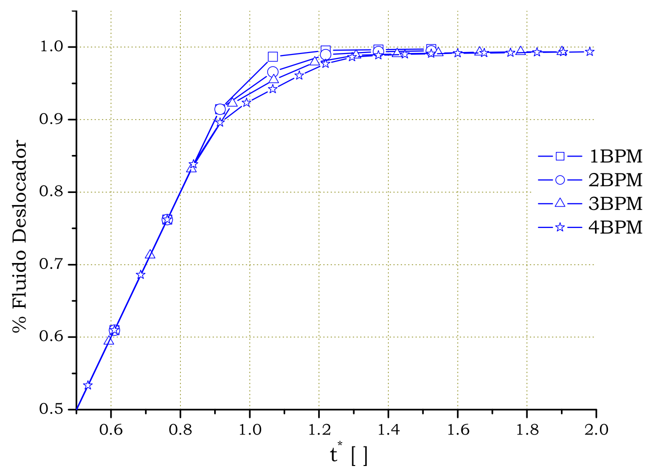

Figura 5.14: Eficiência – $\chi = 0{,}5$

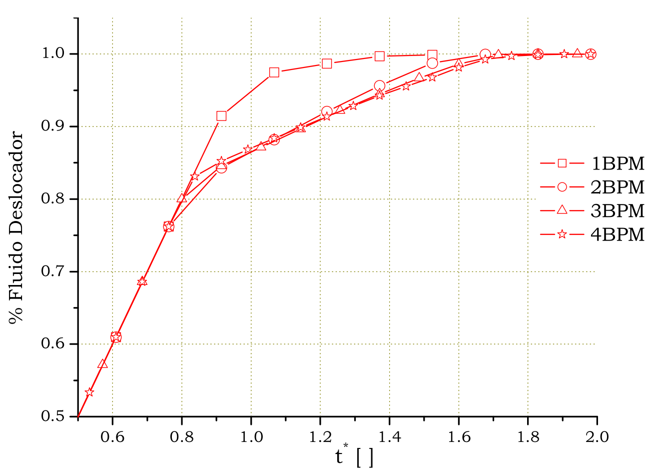

Figura 5.15: Eficiência – $\chi = 1$

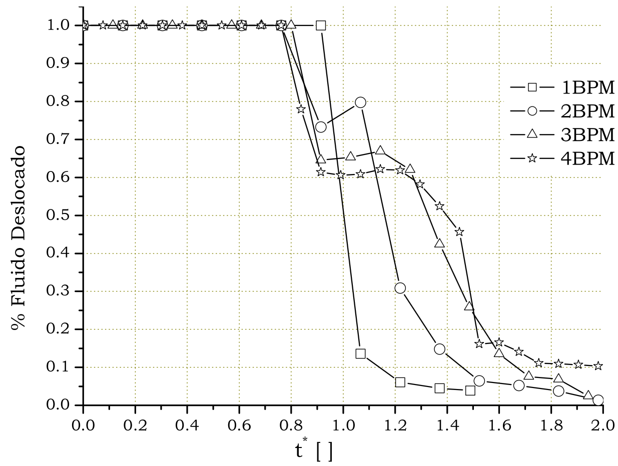

Figura 5.16: Eficiência – $\chi = 0$ - Saída do domínio

Figura 5.17: Seção de saída – $\chi = 0$ - 4 BPM - t* = 0,6 ; 1,1 ; 2

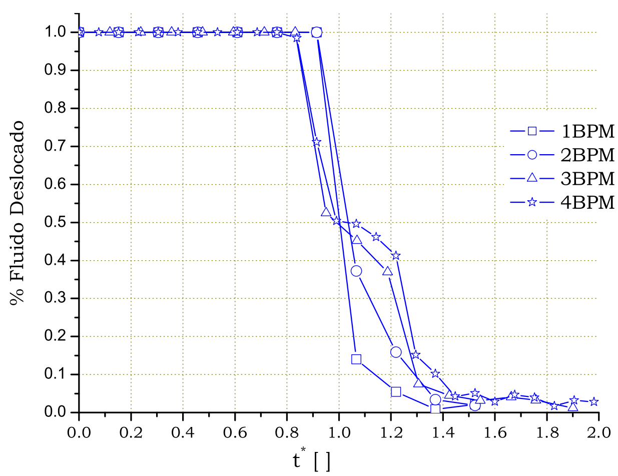

Figura 5.18: Eficiência – $\chi = 0{,}5$ - Saída do domínio

Figura 5.19: Seção de saída – $\chi = 0{,}5$ - 4 BPM - t* = 0,6 ; 1,1 ; 2

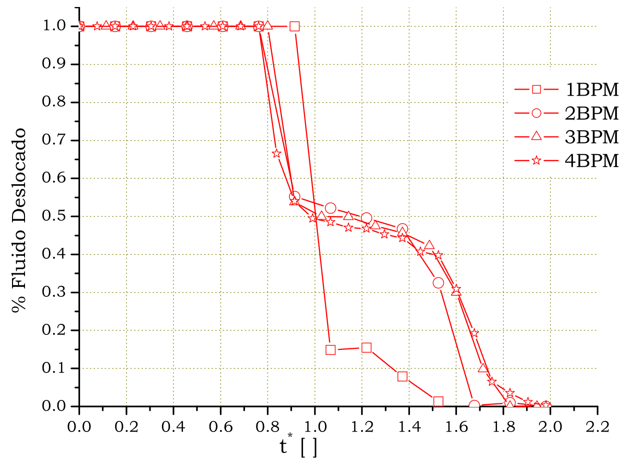

Figura 5.20: Eficiência – $\chi = 1$ - Saída do domínio

Figura 5.21: Seção de saída – $\chi = 1$ - 4 BPM - t* = 0,6 ; 1,1 ; 2