

6

Resultados e Discussão - Caso 2

Nesse capítulo são apresentados e confrontados os resultados obtidos experimental e numericamente do caso 2, onde um fluido newtoniano desloca um não newtoniano. Assim como no capítulo anterior, 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 mesma posição axial fixa $x=1,6\text{ m}$.

Em todos os grupos de três imagens seguintes 6.1 a 6.12, a figura da esquerda e da direita representam o resultado numérico sendo o fluido modelado com as equações constitutivas de *Carreau* e *Herschel-Bulkley*, respectivamente. A figura de baixo mostra a visualização experimental.

Os resultados dos testes experimentais apresentaram interfaces pouco definidas, por causa de uma mistura grande entre os fluidos. Vale reforçar que a mistura não significa difusão. Essa foi uma das preocupações ao adotar esse par de fluidos nos testes. Não foi possível identificar uma relação nítida da forma da interface com a vazão. A dificuldade que o fluido menos viscoso encontrava para deslocar resultava numa interface instável.

6.1

$\chi = 0$ - Excentricidade Máxima

Nas figuras 6.1 a 6.4 vemos as comparações da ponta da interface na situação de excentricidade máxima. Pode-se observar que experimentalmente o fluido deslocador escoava preferencialmente pela região mais larga do anular, de forma bastante ineficiente, perfurando o fluido deslocado. A quantidade de massa remanescente na parede é grande, inclusive em contato com a parede do tubo interno. Os modelos reológicos forneceram formas de interface similares, e qualitativamente razoáveis quando comparadas com o caso experimental.

6.2

$\chi = 0,5$ - Excentricidade Média

Nas figuras 6.5 a 6.8 vemos as comparações da ponta da interface na situação de excentricidade média. Pode-se observar experimentalmente que o fluido deslocador ainda escoava preferencialmente pela região mais larga do anular, de forma bastante ineficiente, perfurando o fluido deslocado. É possível ver ainda um grande massa de fluido deslocado em contato com a parede do tubo externo. Os resultados numéricos, assim como para $\chi = 0$, fornecem uma interface pontiaguda. Pode-se afirmar que com o modelo de *Herschel-Bulkley* o fluido ocupou uma área maior do que a interface formada com o modelo de *Carreau*, o que a princípio sugere que suas imagens são mais próximas das obtidas experimentalmente.

6.3

$\chi = 1$ - Sem Excentricidade

No caso de tubos concêntricos, figuras 6.9 a 6.12, não foi possível obter experimentalmente um escoamento simétrico como os do caso 1 devido a dificuldades operacionais. A já esperada dificuldade de deslocamento de um fluido mais viscoso por um menos viscoso, somada à perturbação gerada pela válvula de esfera contribuíram para a irregularidade do escoamento. Não foi possível obter uma interface bem definida. Os resultados numéricos apresentaram sempre uma simetria nos dois lados do anular e interface bastante pontiaguda, cuja curvatura aumentava conforme crescia a vazão. O modelo de *Herschel-Bulkley* tornou a interface ligeiramente mais larga, no entanto não é possível concluir qual modelo melhor representou o resultado real.

No conjunto de gráficos 6.13 a 6.15 aparecem as eficiências de deslocamento resultantes das simulações numéricas, com o fluido não newtoniano sendo modelado pela equação de *Carreau* (2-33). Já nos gráficos 6.16 a 6.18, o fluido foi modelado pela equação de *Herschel-Bulkley* (2-34).

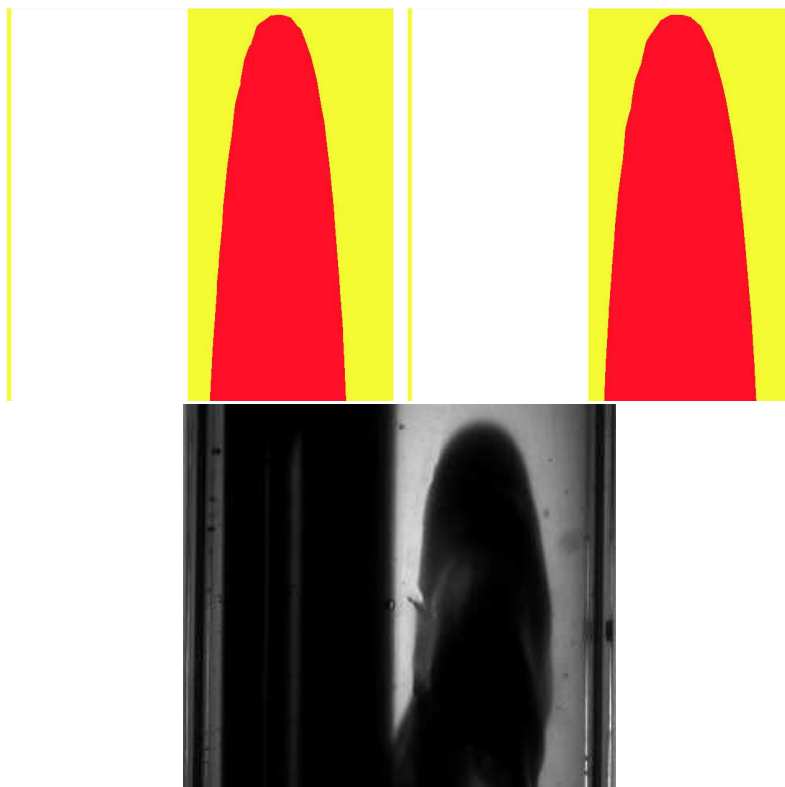
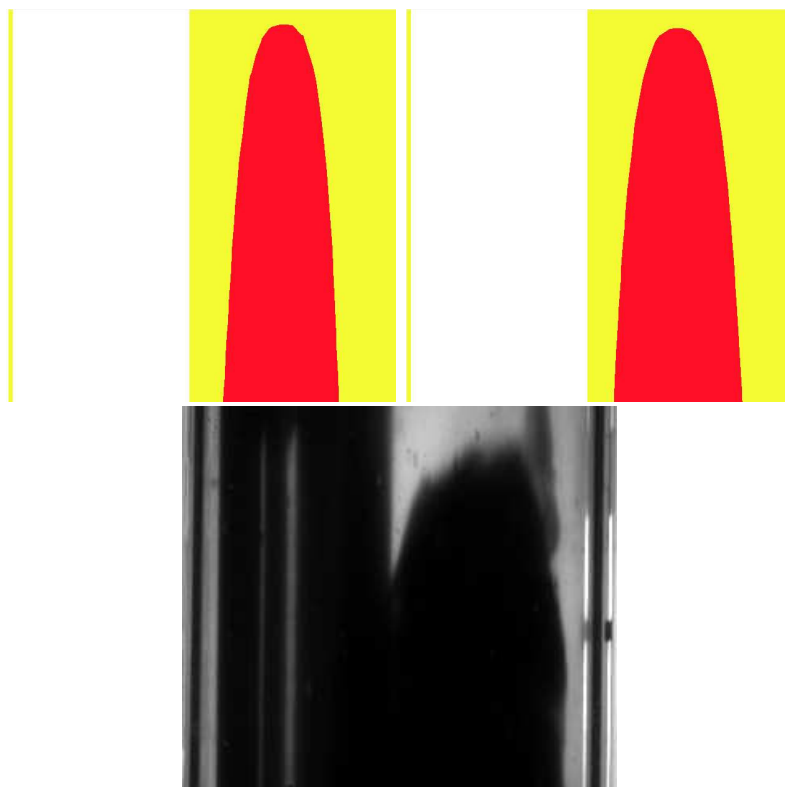
Analisando esses gráficos, pode-se dizer que os casos estudados não apresentaram bons rendimentos na substituição de um fluido por outro. Os resultados com os dois modelos reológicos também apresentaram curvas de eficiência ligeiramente diferentes, sendo que aqueles a partir do modelo de *Carreau* forneceram eficiências maiores. A variação da vazão teve o efeito esperado na eficiência, devido ao efeito *shear – thinning* de diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, em outras palavras

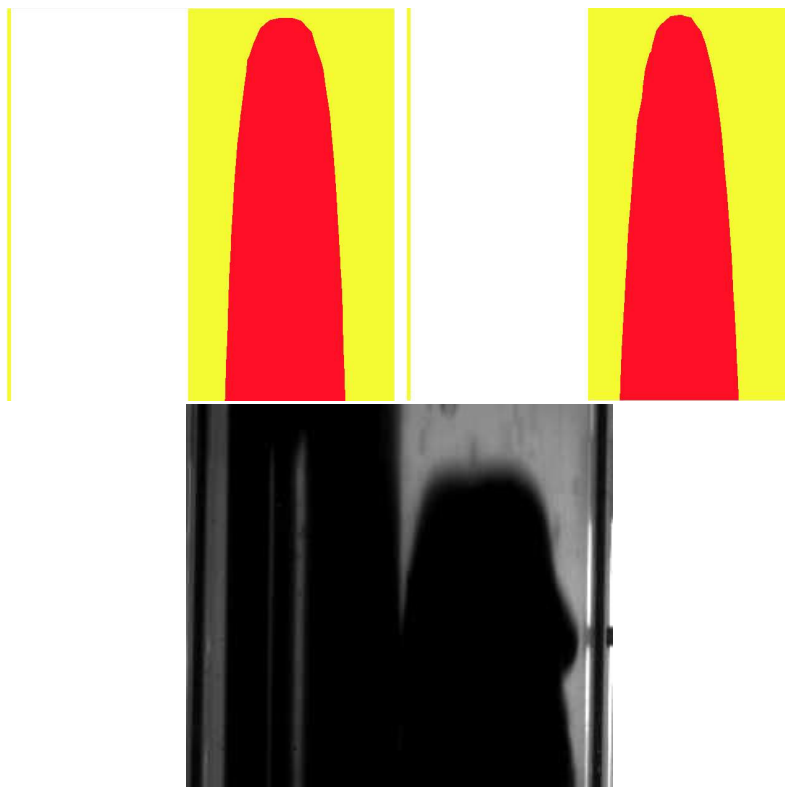
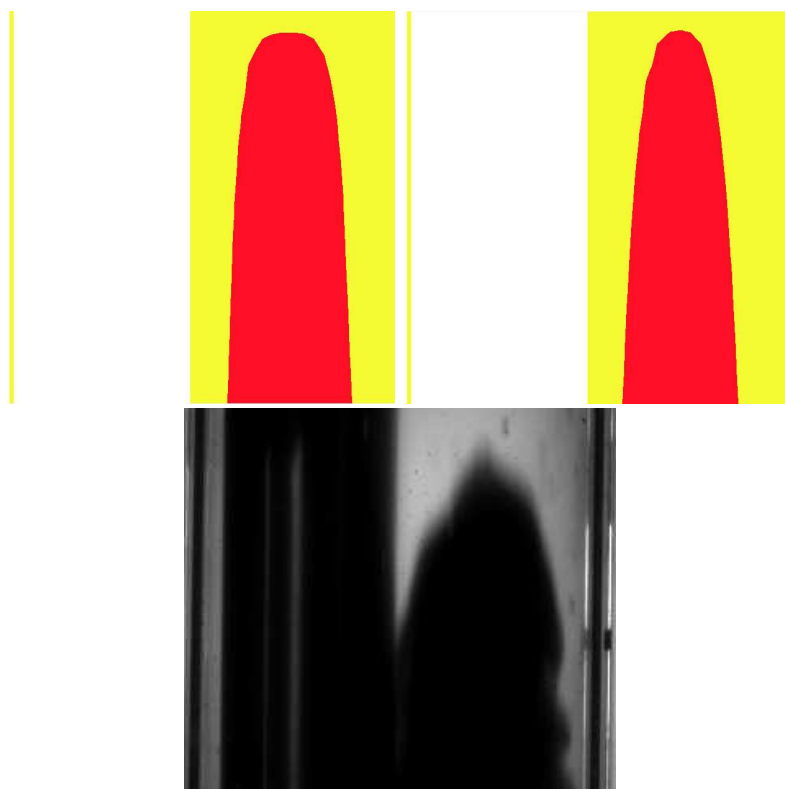
a velocidade. Com menores vazões o fluido deslocado era mais viscoso, o que representou uma dificuldade maior de deslocamento. Por outro lado, na maior vazão, equivalente a 4 BPM foram obtidas as maiores eficiências.

O caso com $\chi = 1$ modelado pela equação de *Herschel-Bulkley* apresentou um efeito curioso. Aparentemente o fluido deslocador não é capaz de substituir o fluido inicial após $t^*=0,8$. A partir desse instante, forma-se um escoamento preferencial de água por dentro do carbopol. Esse efeito não aparece nas outras excentricidades, onde apesar das baixas eficiências existe um contínuo aumento da massa de fluido deslocador no interior do volume anular. Modelado pela equação de *Carreau*, esse efeito citado acima ocorre somente com $\chi = 1$ e 1 BPM.

No conjunto de gráficos 6.19 a 6.23 vemos as eficiências de deslocamento avaliadas na superfície de saída do domínio computacional sendo o fluido avaliado pelo modelo de *Carreau*; e os gráficos 6.25 a 6.29 pelo modelo *Herschel-Bulkley*.

Nesses gráficos vemos que não existe aquela queda brusca como no caso 1. A ausência de quedas bruscas caracterizam um mau deslocamento. Modelado com a equação de *Carreau*, após um tempo de $t^*=1,8$, nas excentricidades $\chi = 0$ e $\chi = 0,5$ o percentual de fluido deslocado atinge 60%, enquanto que no caso 1, esse percentual foi de 5%. Com excentricidade $\chi = 1$ o percentual chegou a 40%. Quando modelado por *Herschel-Bulkley*, nas excentricidades $\chi = 0$ e $\chi = 0,5$, o percentual que cruza a saída é aproximadamente 70%; com $\chi = 1$ esse percentual atinge um patamar constante de 35%.

Figura 6.1: Caso 2 – $\chi = 0 - 1\text{BPM}$ Figura 6.2: Caso 2 – $\chi = 0 - 2\text{BPM}$

Figura 6.3: Caso 2 – $\chi = 0 - 3$ BPMFigura 6.4: Caso 2 – $\chi = 0 - 4$ BPM

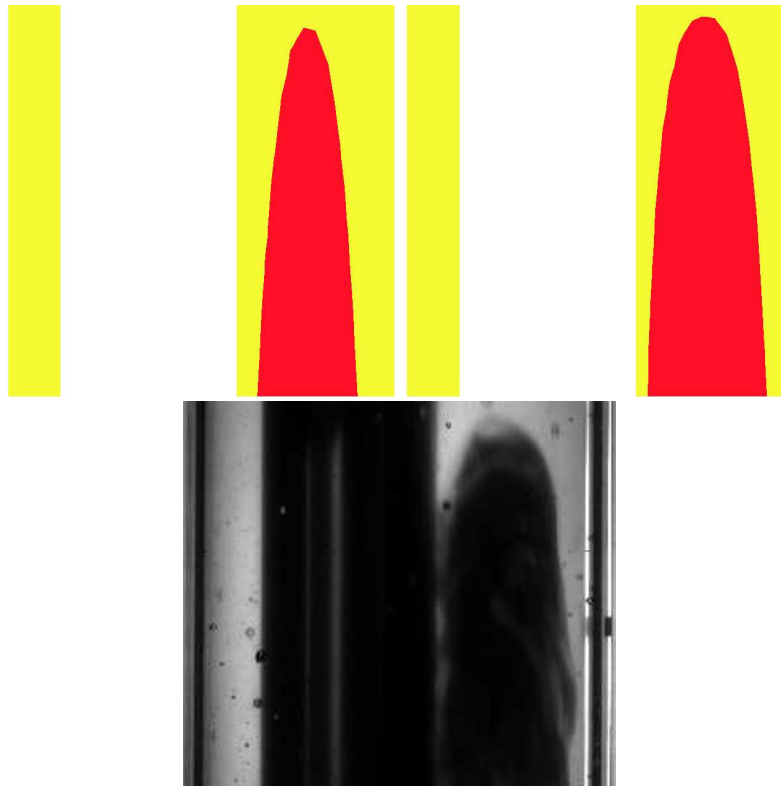


Figura 6.5: Caso 2 – $\chi = 0,5 - 1$ BPM

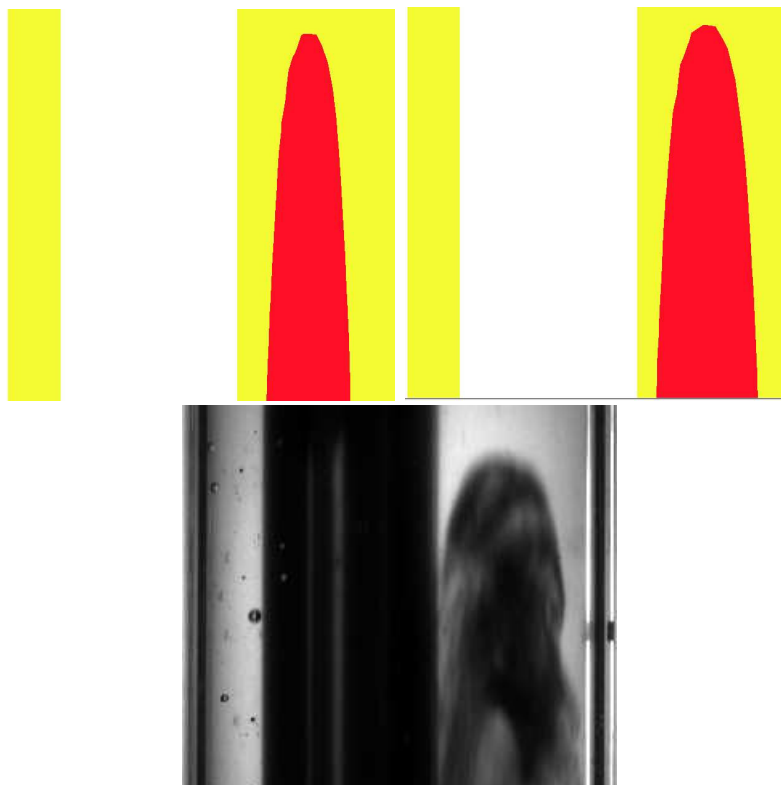


Figura 6.6: Caso 2 – $\chi = 0,5 - 2$ BPM

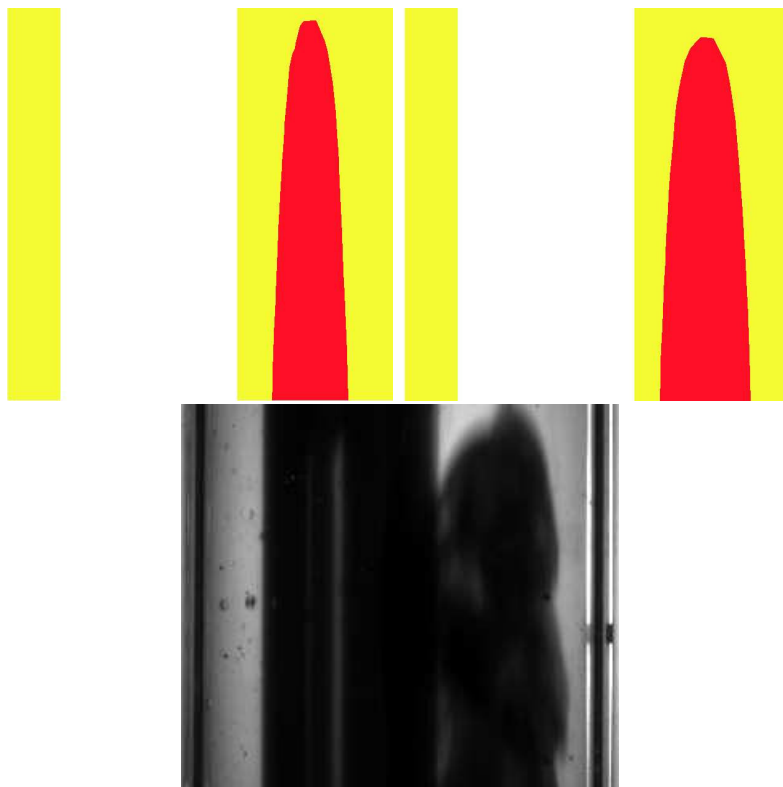


Figura 6.7: Caso 2 – $\chi = 0,5 - 3$ BPM

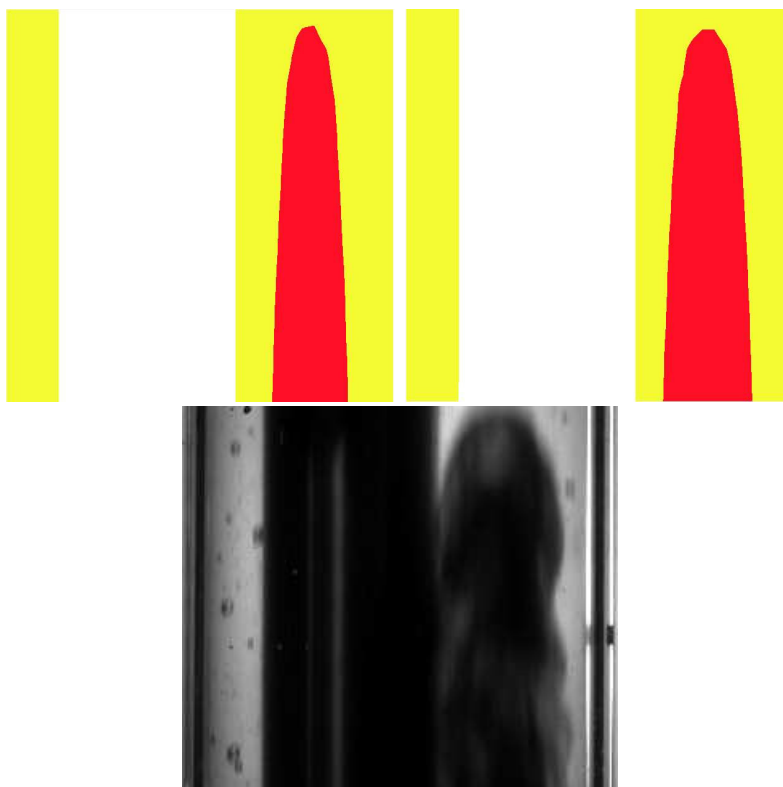


Figura 6.8: Caso 2 – $\chi = 0,5 - 4$ BPM



Figura 6.9: Caso 2 – $\chi = 1 - 1$ BPM

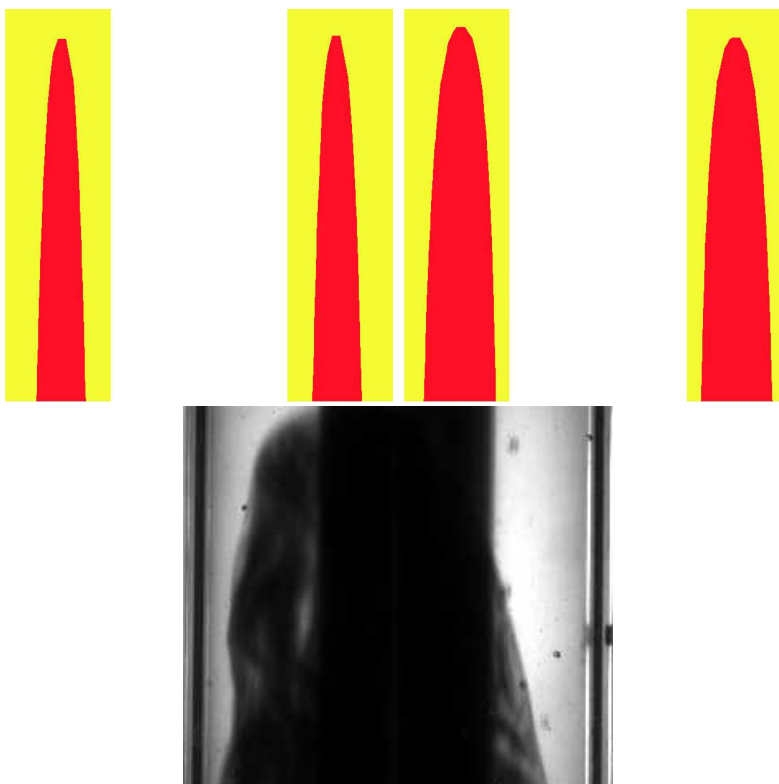


Figura 6.10: Caso 2 – $\chi = 1 - 2$ BPM

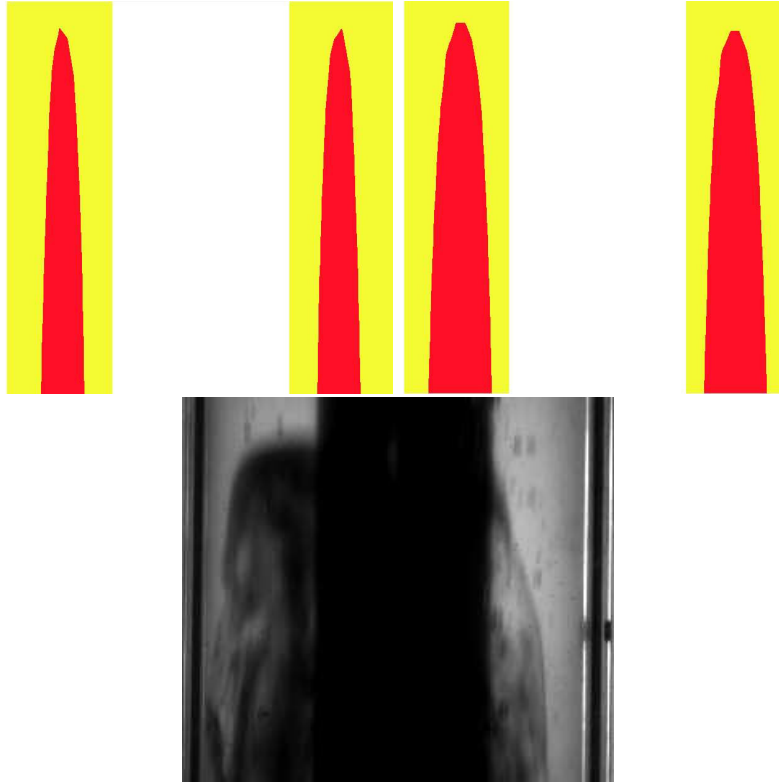


Figura 6.11: Caso 2 - $\chi = 1 - 3$ BPM

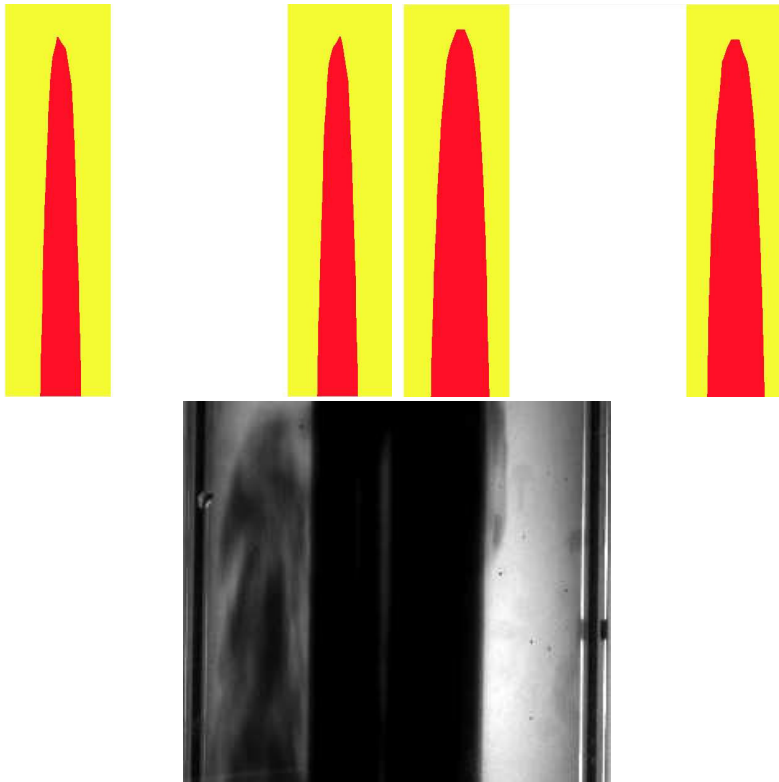
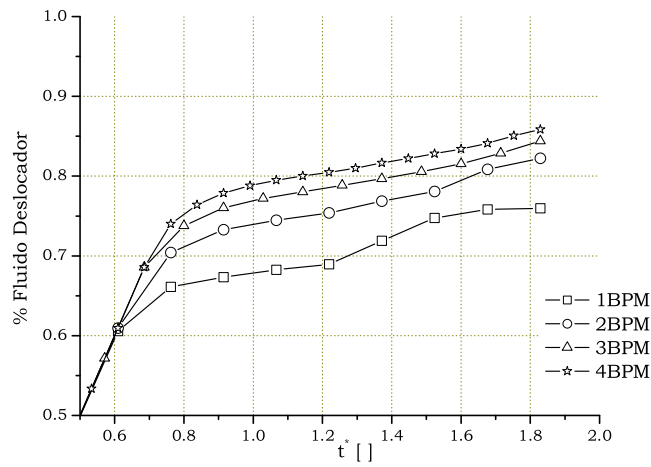
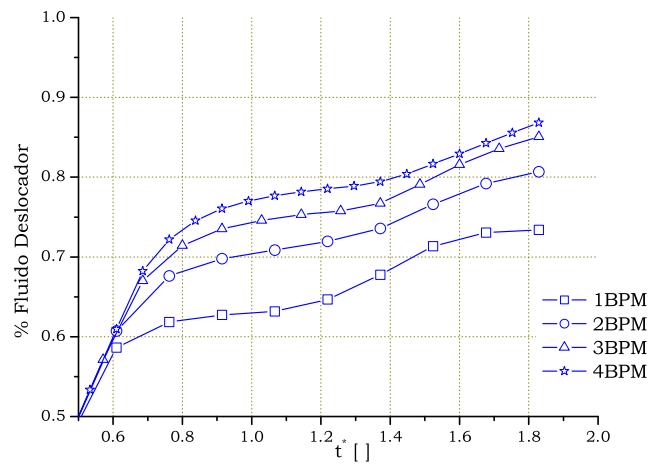
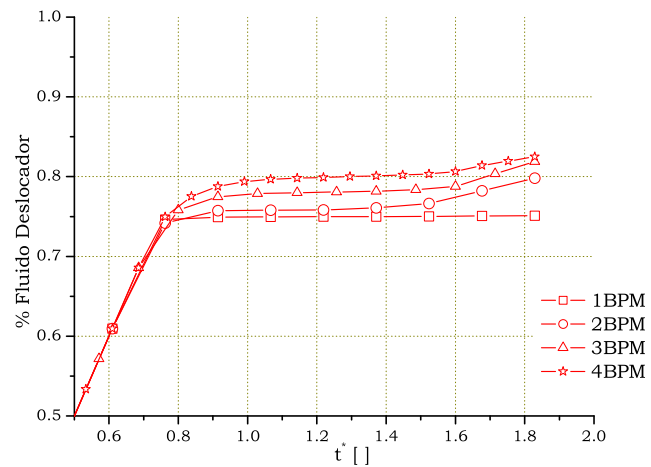
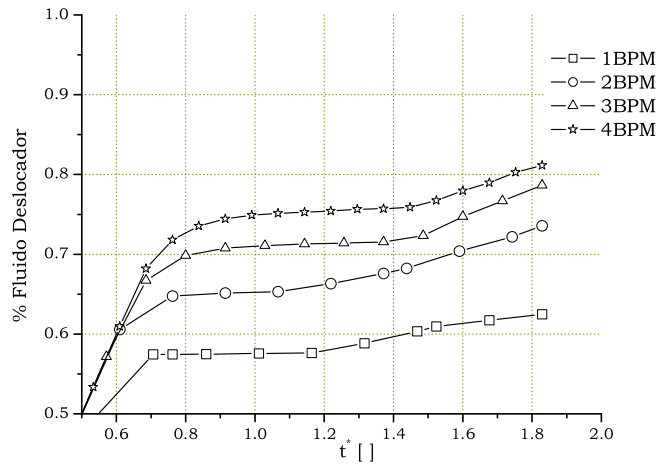
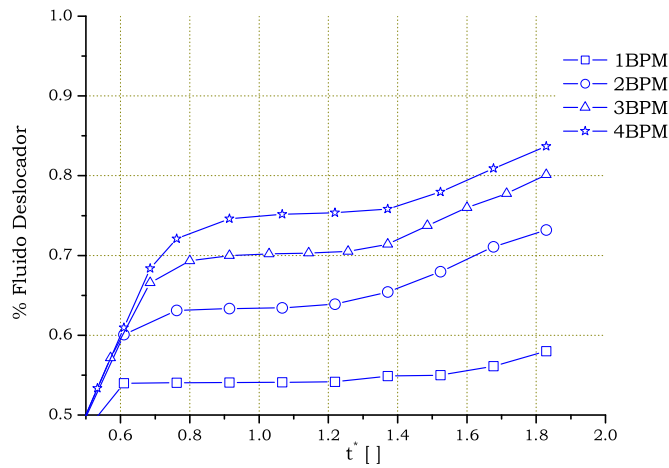
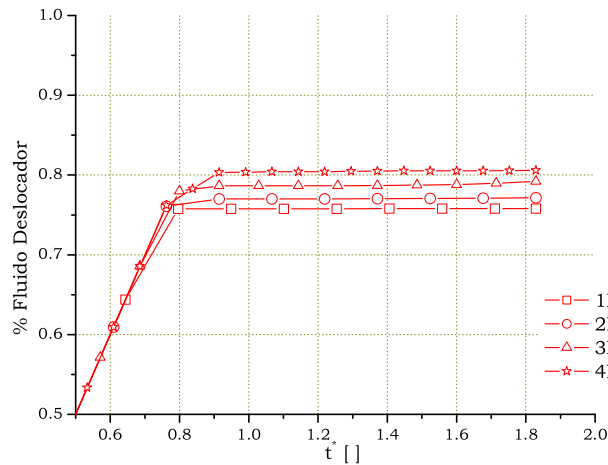


Figura 6.12: Caso 2 - $\chi = 1 - 4$ BPM

Figura 6.13: Eficiência - $\chi = 0$ - CarreauFigura 6.14: Eficiência - $\chi = 0,5$ - CarreauFigura 6.15: Eficiência - $\chi = 1$ - Carreau

Figura 6.16: Eficiência – $\chi = 0$ – *Herschel-Bulkley*Figura 6.17: Eficiência – $\chi = 0,5$ – *Herschel-Bulkley*Figura 6.18: Eficiência – $\chi = 1$ – *Herschel-Bulkley*

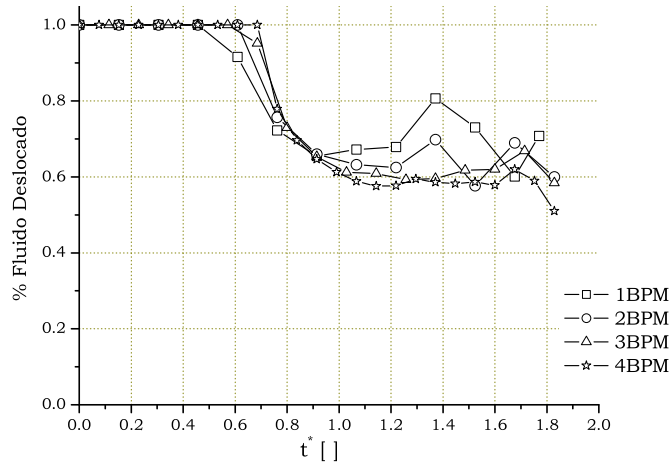


Figura 6.19: Eficiência – $\chi = 0$ – Saída do domínio - *Carreau*



Figura 6.20: Cortes na seção de saída – $\chi = 0$ - 1 BPM - Modelo de *Carreau* - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$

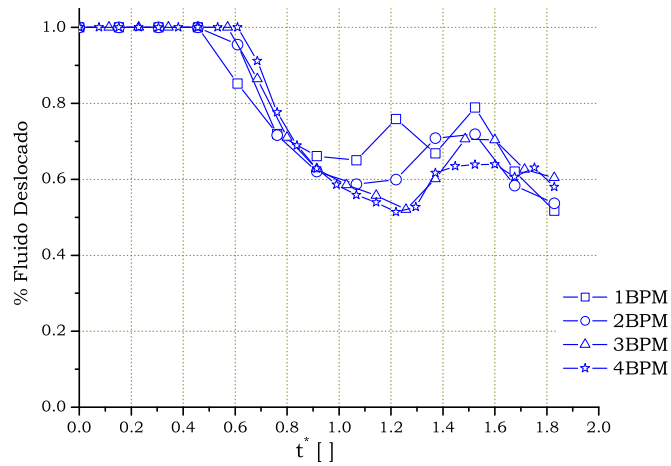


Figura 6.21: Eficiência – $\chi = 0,5$ – Saída do domínio - *Carreau*



Figura 6.22: Cortes na seção de saída – $\chi = 0,5$ - 1 BPM - Modelo de *Carreau* - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$

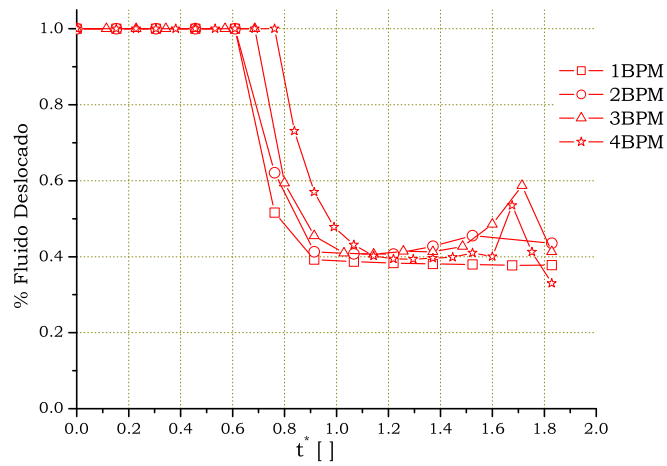


Figura 6.23: Eficiência – $\chi = 1$ – Saída do domínio - *Carreau*



Figura 6.24: Cortes na seção de saída – $\chi = 1$ - 1 BPM - Modelo de *Carreau*
- $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$

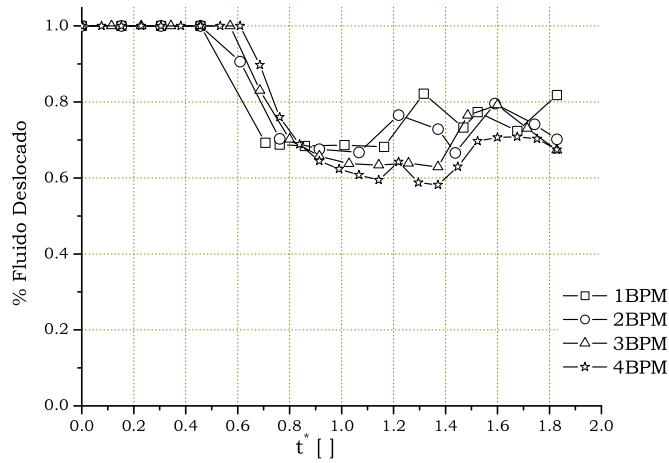


Figura 6.25: Eficiência – $\chi = 0$ – Saída do domínio - *Herschel-Bulkley*

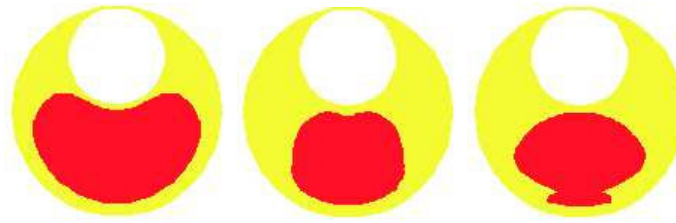


Figura 6.26: Cortes na seção de saída – $\chi = 0$ - 1 BPM - Modelo de *Herschel-Bulkley* - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$

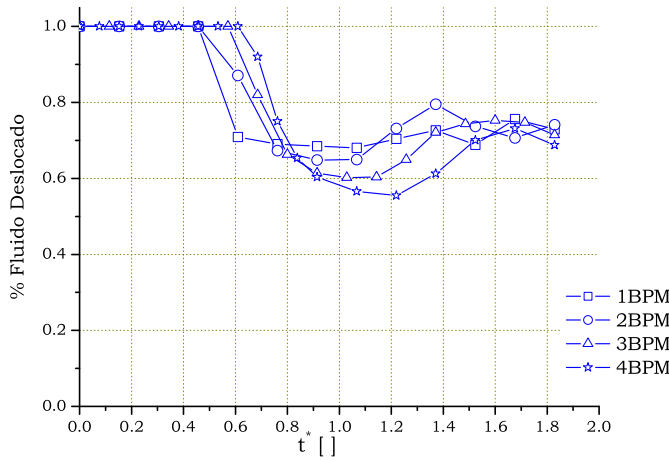


Figura 6.27: Eficiência – $\chi = 0,5$ – Saída do domínio - *Herschel-Bulkley*



Figura 6.28: Cortes na seção de saída – $\chi = 0,5$ - 1 BPM - Modelo de *Herschel-Bulkley* - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$

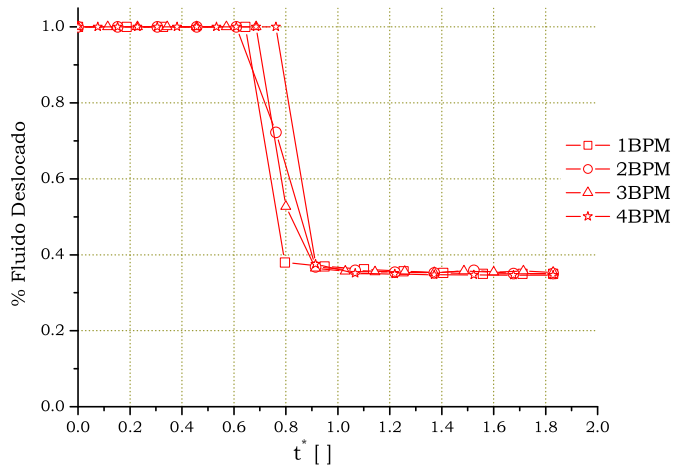


Figura 6.29: Eficiência – $\chi = 1$ – Saída do domínio - *Herschel-Bulkley*



Figura 6.30: Cortes na seção de saída – $\chi = 1$ - 1 BPM - Modelo de *Herschel-Bulkley* - $t^* = 0,6 ; 1,1 ; 2$