

4 Resultados

4.1 Comparativo de três fluidos em uma mesma geometria

A seguir são apresentados os resultados das simulações numéricas, considerando diferentes geometrias e diferentes parâmetros reológicos. Serão também feitas algumas comparações das relações entre vazão e perda de pressão com resultados experimentais encontrados na literatura.

A geometria analisada inicialmente nas simulações foi considerada igual à geometria que está sendo utilizada numa etapa experimental, que está sendo desenvolvida paralelamente a este trabalho, no Laboratório de Caracterização de Fluidos, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RJ. Esta geometria é mostrada na Fig. abaixo.

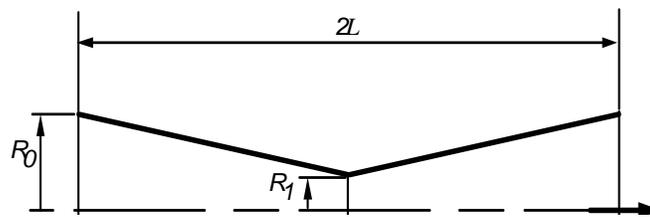


Fig. 4.1 – Geometria # 1 ($R_0 = 0.075$ m, $R_1 = 0.025$ m e $L = 0.15$ m).

Embora os resultados experimentais ainda não estejam disponíveis, está sendo utilizado um fluido viscoelástico, solução aquosa com 30% de PEG (peso molecular = 35.000 g/mol) e 0.05% de PEO (peso molecular = 5.000.000 g/mol). Os parâmetros reológicos do fluido foram obtidos com o reômetro rotacional ARES, utilizado para medir a viscosidade cisalhante, e com o reômetro de bocais opostos, utilizado para medir a viscosidade extensional. O fluido apresentou viscosidade de cisalhamento com um valor constante de 0.6 Pa.s, para valores de taxa de cisalhamento entre 0,5 e 1.000 1/s. O mesmo aconteceu com o valor da viscosidade extensional, que apresentou um valor praticamente constante, igual a

8 Pa.s. Este fluido, que chamaremos de Fluido 1, foi utilizado como fluido base para as simulações numéricas.

Outros fluidos foram estudados considerando a variação da viscosidade extensional em função da taxa de extensão de acordo com a equação de Carreau, dada por:

$$\eta_E = \eta_0 \left[1 + (\lambda_E \dot{\gamma})^2 \right]^{(n_E - 1)/2} \quad (4.1)$$

onde:

η_E - Viscosidade extensional

$\dot{\gamma} \equiv (2trD^2)^{1/2}$ - Taxa de deformação

η_0, λ_E, n_E - Parâmetros reológicos

Nos casos analisados, consideramos o expoente de potência (n_E) maior do que a unidade, representando o comportamento qualitativo da maioria dos polímeros, i.e., a viscosidade extensional crescendo com a taxa de deformação. A viscosidade cisalhante foi mantida constante e igual a 0.6 Pa.s. A tabela 5.1 lista os parâmetros reológicos utilizados na simulação dos quatro fluidos modelados nesta etapa do trabalho.

Fluido	η_0 (Pa.s)	λ_E (s)	n_E
#1	8	1	1
#2	8	0,8	5
#3	8	8	2
#4	30	20	1,2

Tabela 4.1 – Parâmetros reológicos

O gráfico a seguir mostra a variação da viscosidade extensional com a taxa de deformação, para os quatro fluidos descritos na tabela 4.1.

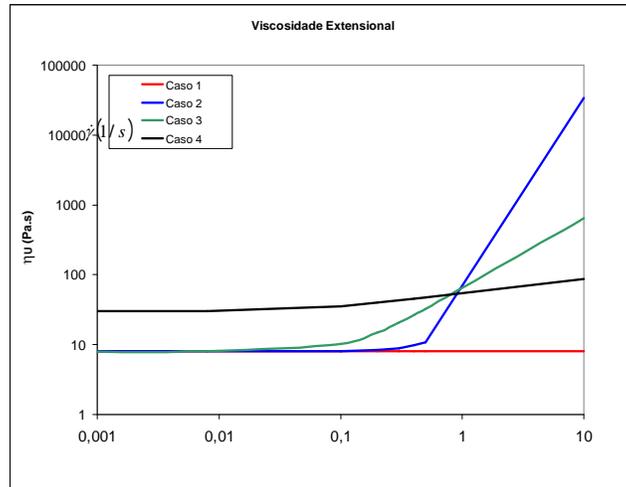


Fig. 4.2 – Variação da viscosidade extensiva.

A Figs a seguir apresentam os campos do classificador de escoamento R para as simulações com os 4 fluidos. É interessante observar que na região da linha de centro, o classificador R apresenta valores próximos de zero, o que representa escoamento com característica predominantemente extensional. Na região próxima às paredes o classificador R apresenta valores perto de um, ou seja, escoamento com característica predominantemente cisalhante. Observa-se também que para o fluido 4, o comportamento extensional predomina numa região maior do escoamento, devido aos maiores valores de viscosidade extensiva na faixa de taxas de deformação encontradas.

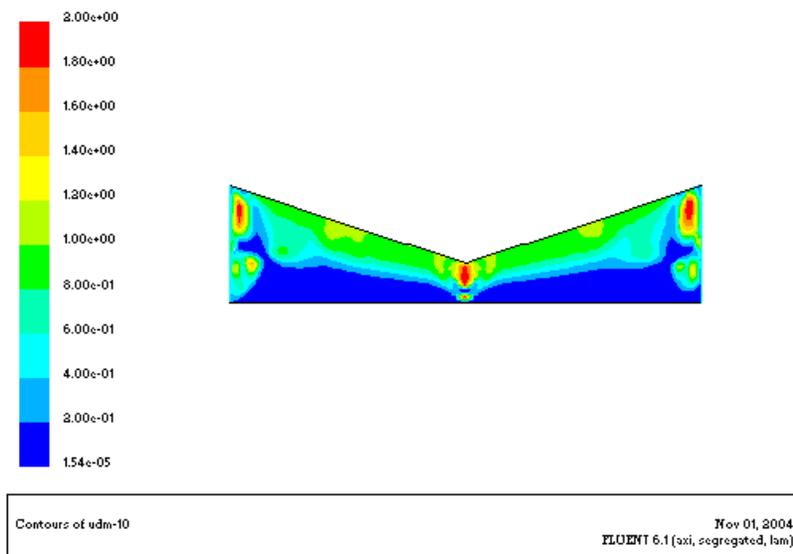


Fig. 4.3 – Classificador de escoamento R, Fluido # 1.

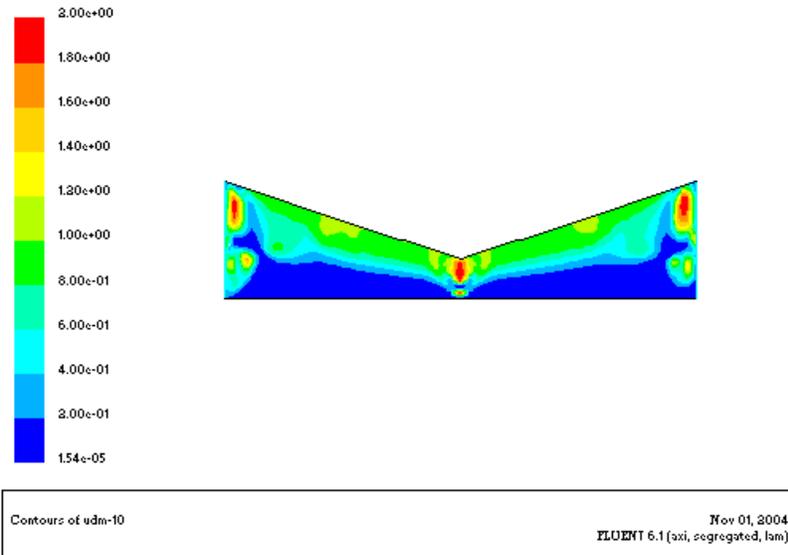


Fig. 4.4 – Classificador de escoamento R, Fluido # 2.

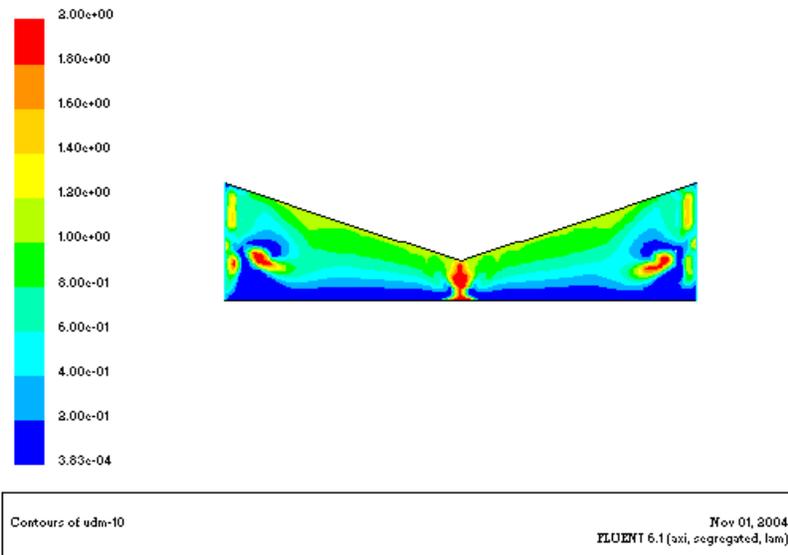


Fig. 4.5 – Classificador de escoamento R, Fluido # 3.

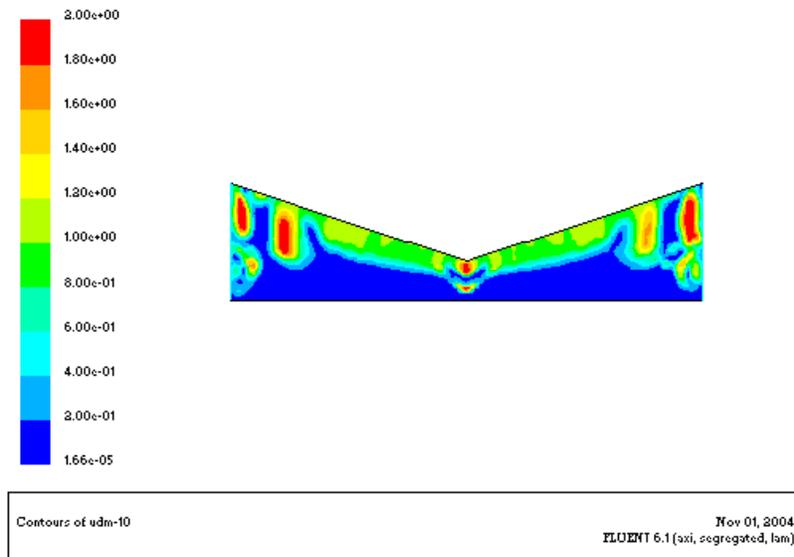


Fig. 4.6 – Classificador de escoamento R, Fluido # 4.

A função viscosidade é uma media geométrica entre as funções viscosidades de cisalhamento e de extensão em função do classificador R.

$$\eta(\dot{\gamma}, R) = \eta_s (\dot{\gamma})^R \cdot \eta_u (\dot{\gamma})^{R-1} \quad (4.2)$$

As Fig.s abaixo mostram os campos da taxa de cisalhamento utilizados para o calculo da viscosidade:

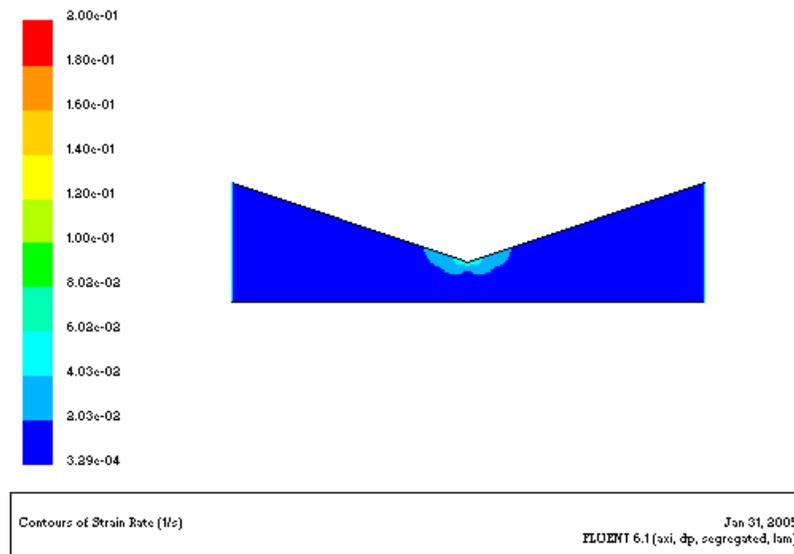


Fig. 4.7 Campo da taxa de cisalhamento, Fluido # 1.

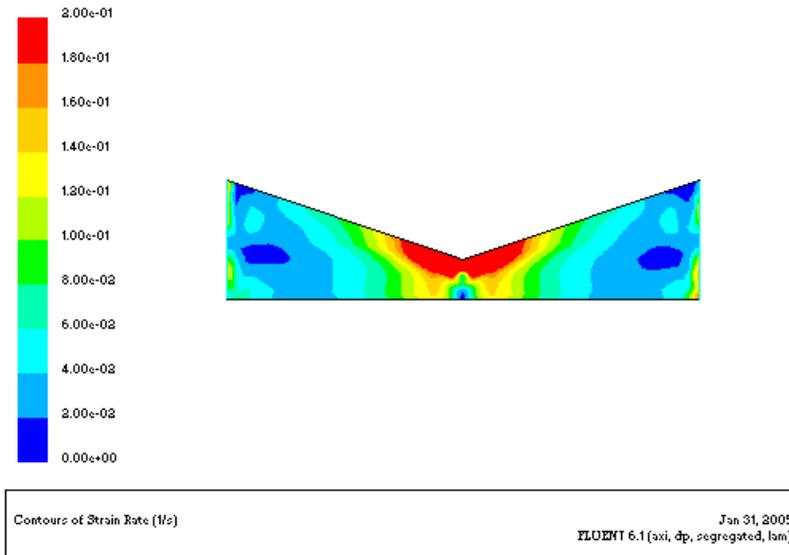


Fig. 4.8 Campo da taxa de cisalhamento, Fluido # 2.

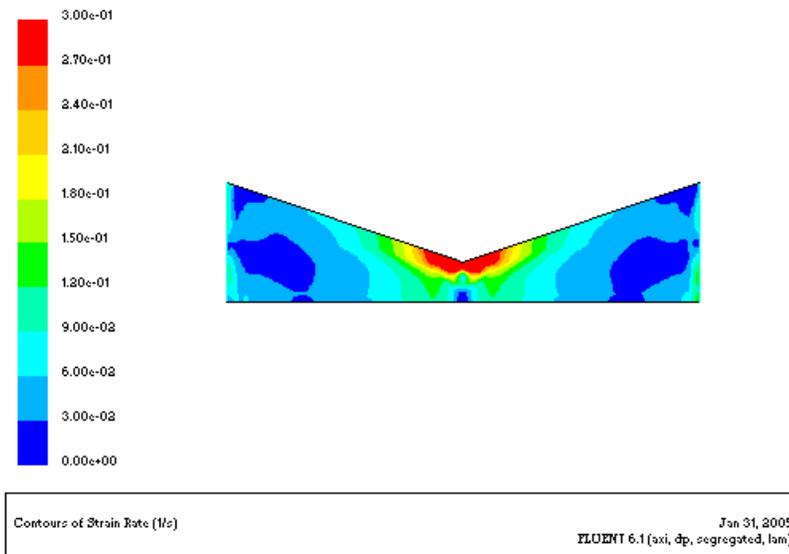


Fig. 4.9 Campo da taxa de cisalhamento, Fluido # 3.

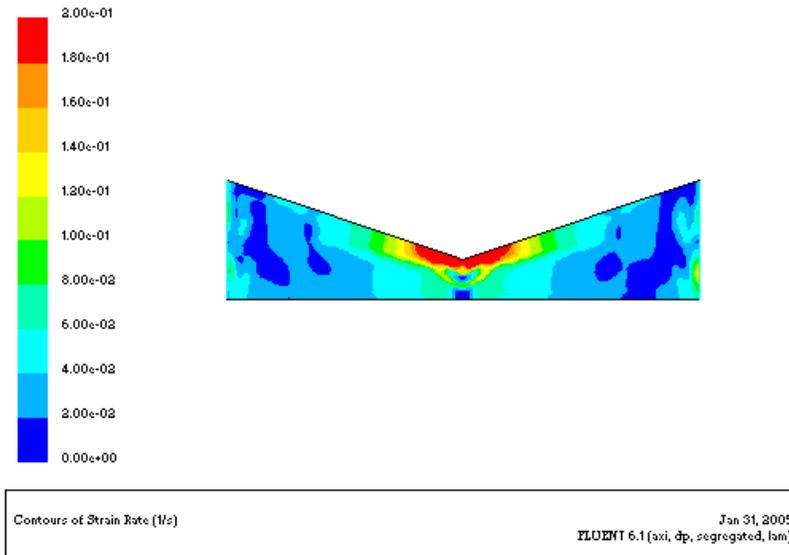


Fig. 4.10 Campo da taxa de cisalhamento, Fluido # 4.

As Fig.s abaixo mostram os campos de viscosidade calculados de acordo com a equação 4.2. Os valores mais elevados de viscosidade correspondem à região onde o comportamento extensional é predominante, conforme o esperado.

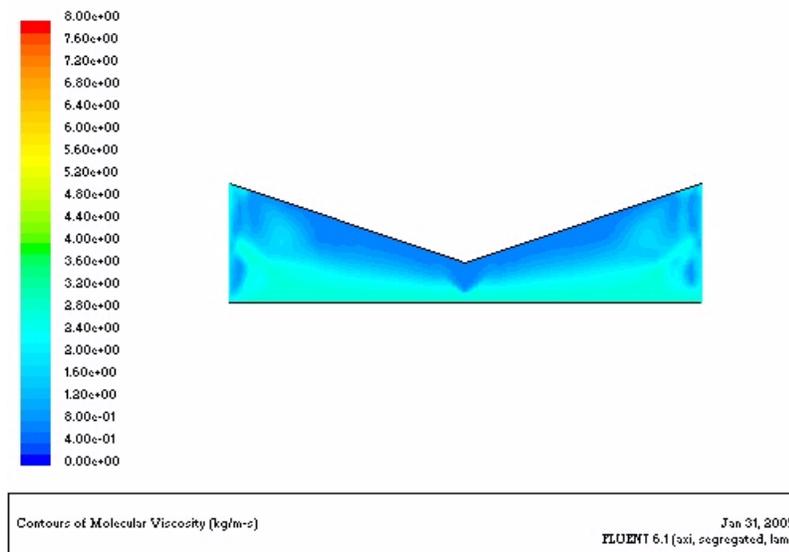


Fig. 4.11 Campo da viscosidade, Fluido # 1.

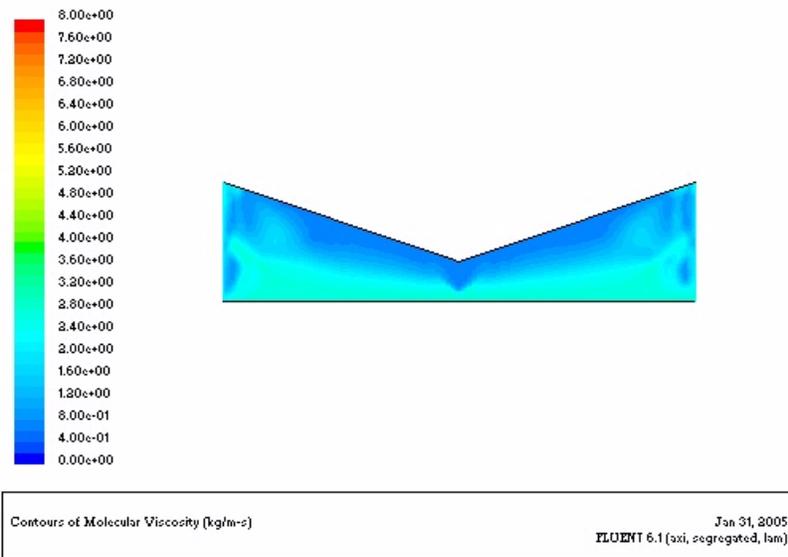


Fig. 4.12 Campo da viscosidade, Fluido # 2.

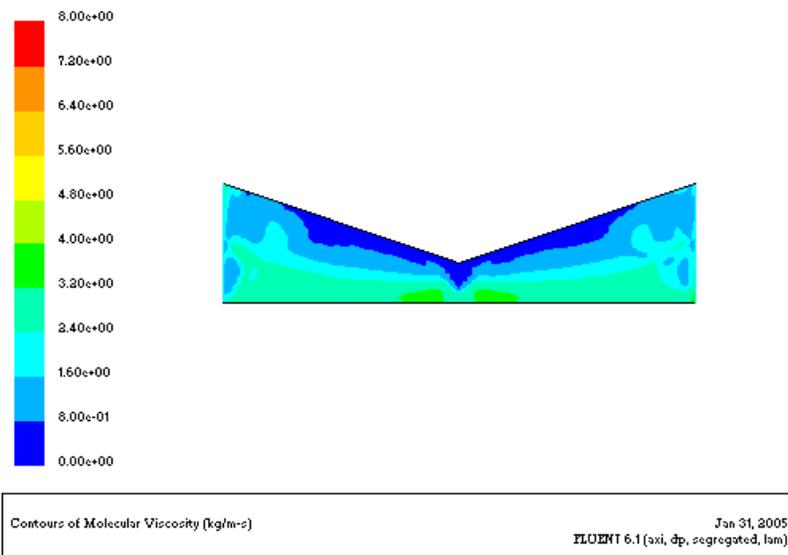


Fig. 4.13 Campo da viscosidade, Fluido # 3.

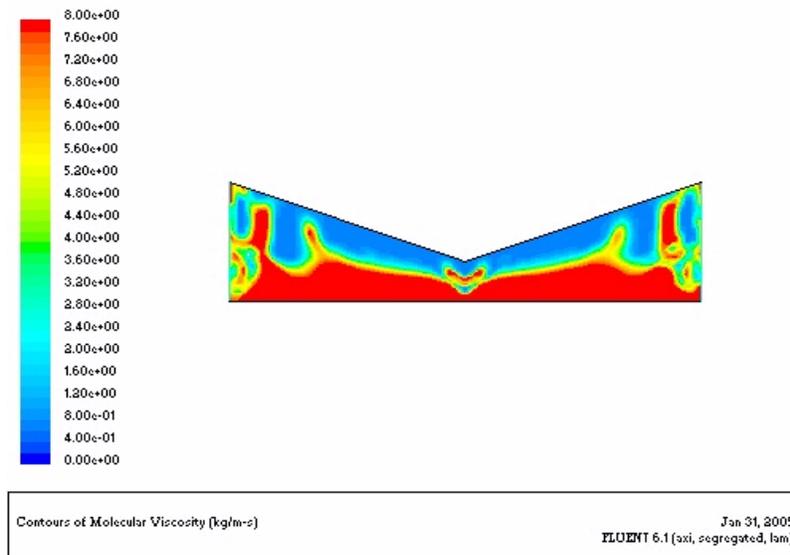


Fig. 4.14 Campo da viscosidade, Fluido # 4.

Os resultados dos campos de velocidades para um gradiente de pressão igual a 2 Pa/m são mostrados na Fig. 5.5. Cabe lembrar que houve um processo iterativo para chegar a este resultado. O classificador R foi calculado primeiramente para um campo de velocidades de um fluido Newtoniano. Em função deste campo do classificador R é calculado o primeiro campo de viscosidades. O novo campo de viscosidades é utilizado para calcular o campo de velocidades. Este procedimento é repetido até que o critério de convergência seja alcançado, determinando a solução do problema.

Para os fluidos 1, 2 e 3 os campos de velocidade apresentaram comportamento esperado, ou seja, velocidades maiores na linha de centro. Porém no fluido # 4, que possui um comportamento extensional mais forte, pode-se observar que o campo de velocidades apresenta velocidades máximas um pouco deslocadas da linha de centro, devido às altas viscosidades apresentadas na zona de altas taxas de extensão (mais próximas da parede).

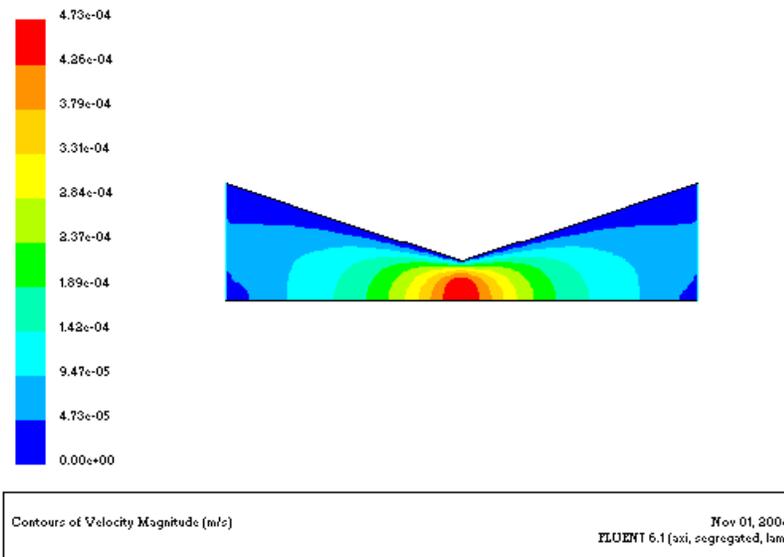


Fig. 4.15 Campo de velocidade, Fluido #1.

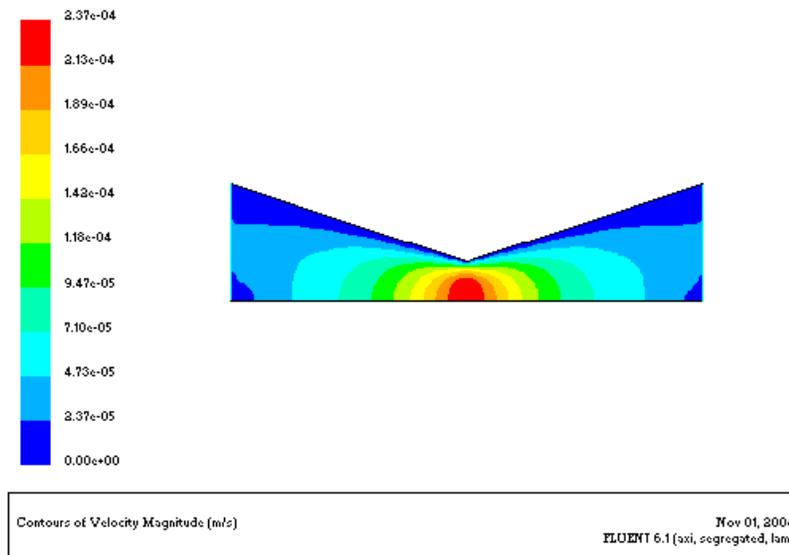


Fig. 4.16 Campo de velocidade, Fluido #2.

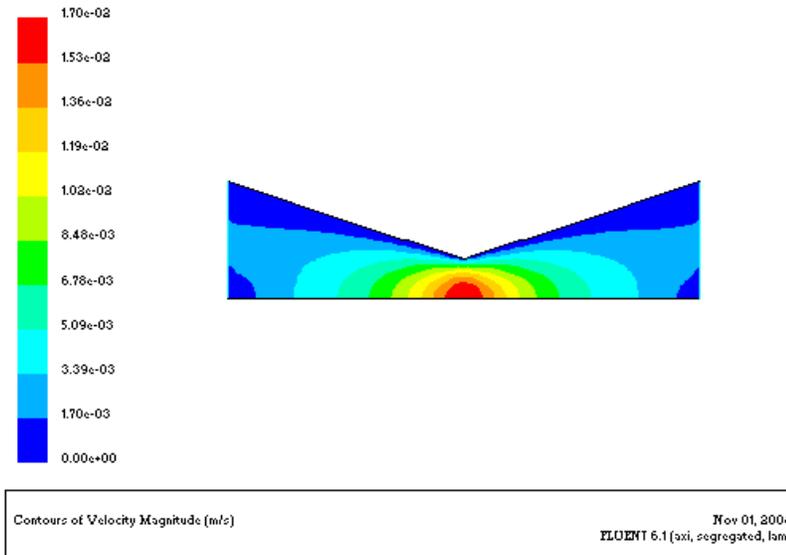


Fig. 4.17 Campo de velocidade, Fluido #3.

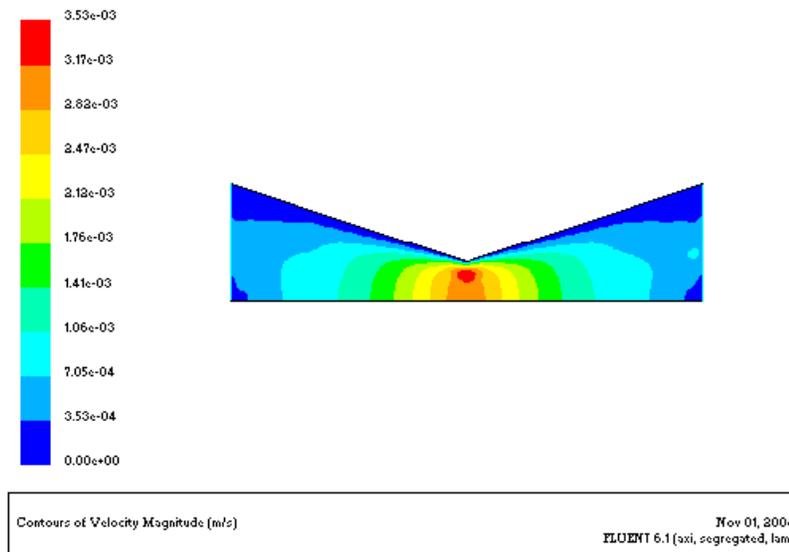


Fig. 4.18 Campo de velocidade, Fluido #4.

A relação entre vazão e perda de pressão obtida numericamente foi comparada com os resultados teóricos obtidos utilizando a equação simplificada para escoamento em meios porosos proposto por Souza Mendes e Naccache, 2002. Conforme a equação abaixo:

$$Q = N\pi R_1^3 \left\{ \frac{3(n+1)L_*^{(n-1)}}{2^{(n+4)} K (1 - R_*^{3(n+1)})} (\Delta p)_{cycle} \right\}^{\frac{1}{(n+1)}} \quad (4.3)$$

onde,

$$N = \frac{3A\phi(1-R_*)}{\pi R_0^2(1-R_*^3)}; \quad (\Delta p)_{cycle} = p(0) - p(2L); \quad R_* = R_1 / R_0; \quad L_* = L / (R_0 - R_1),$$

$$\phi = \frac{\nabla_{Vazio}}{\nabla_{Total}} = \frac{\nabla_{Canal-convxdiv}}{\nabla_{Cubo}} = \text{Porosidade},$$

$$K = \eta_0 \text{ e } n = n_E.$$

Os parâmetros reológicos e geométricos utilizados no cálculo do resultado teórico são mostrados na tabela 4.2.

Fluido	η_0	n_E	R_0	R_1	L
#1	8	0	0,075	0,025	0,15
#2	16	0,5	0,075	0,025	0,15
#3	30	0,6	0,075	0,025	0,15
#4	45	0,1	0,075	0,025	0,15

Tabela 4.2 – Parâmetros geométricos e reológicos.

As Fig.s a seguir mostram as comparações para os fluidos #2, #3 e #4.

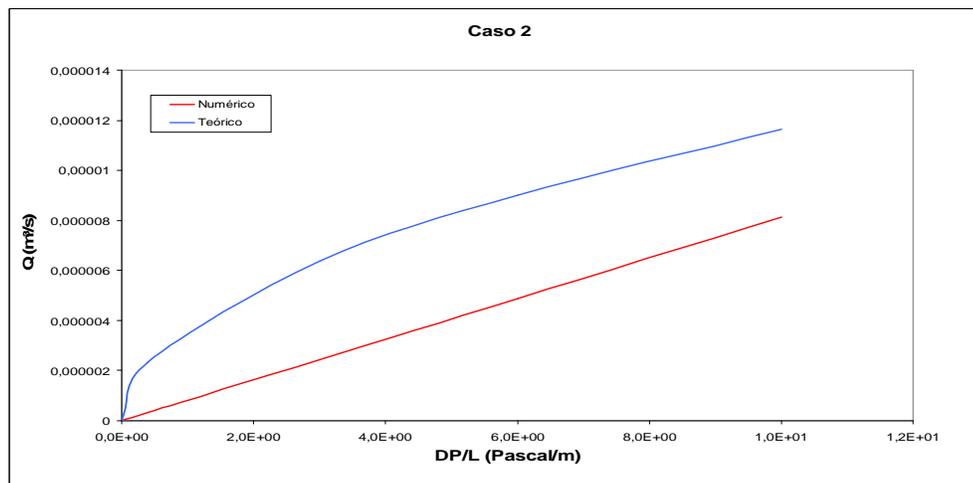


Fig. 4.19 – Comparação dos resultados do fluido #2.

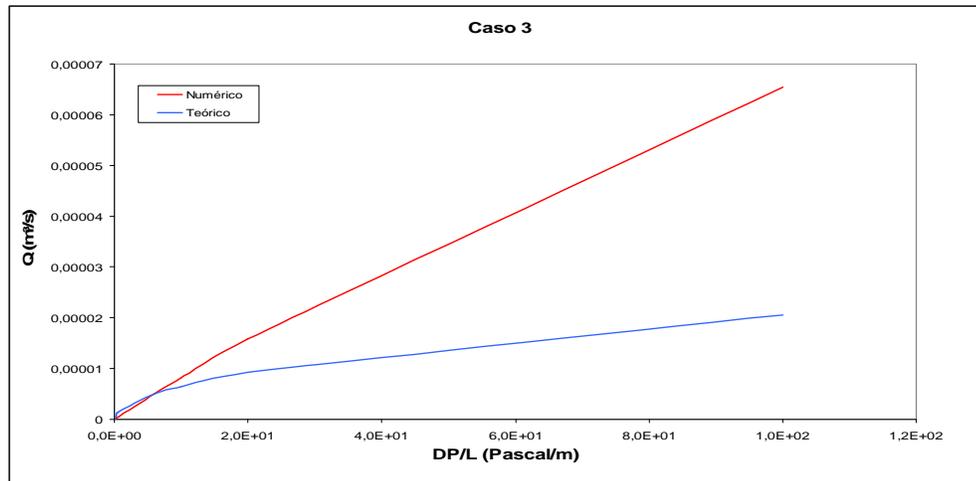


Fig. 4.20 – Comparação dos resultados do fluido #3.

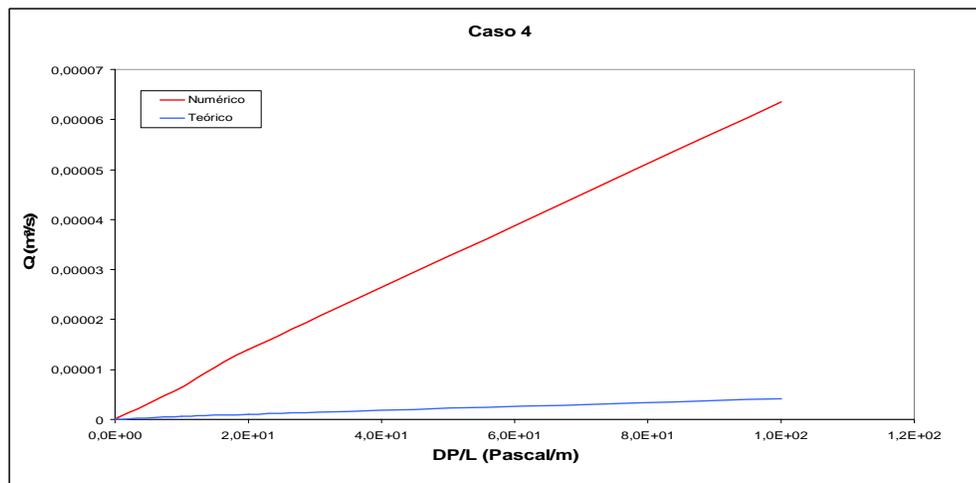


Fig. 4.21 – Comparação dos resultados do fluido #4.

Observa-se que a comparação não é satisfatória. Isto ocorre devido às características cinemáticas do escoamento, pois a extensão não é predominante. Além disso, é importante também considerar as propriedades reológicas. Os fluidos em que as diferenças entre viscosidade extensional e cisalhante são maiores (fluidos #3 e #4), apresentam comportamento qualitativo mais próximo do obtido pelo modelo teórico, i.e., uma variação não linear entre a vazão e a queda de pressão. É importante observar que para fluidos inelásticos, a queda de pressão varia linearmente com a vazão. Quanto maior a elasticidade do fluido, mais não linear é a relação. Nota-se que qualitativamente os resultados com os fluidos 3 e 4 são melhores

4.2 Comparativo de dois fluidos em três geometrias geometria

Posteriormente, modelamos fluidos com características semelhantes aos utilizados no experimento de Chmielewski & Jayaraman (1992). Desta vez além da variação do comportamento reológico variamos também a geometria do canal convergente-divergente de forma a investigar a importância dos parâmetros geométricos no escoamento.

Nesta fase foram modelados dois fluidos viscoelásticos com comportamento de aumento da viscosidade extensional com a taxa de extensão (*extensional-thickening*) de acordo com a equação *power-law*, sendo os valores de viscosidade limitados por um valor mínimo e máximo, $\eta_{E \min}$ e $\eta_{E \max}$. A viscosidade de cisalhamento foi mantida constante.

$$\eta_E = \eta_0 \dot{\gamma}^{n_E} \quad (4.3)$$

A tabela 5.3 lista os parâmetros reológicos usados para modelar os fluidos nesta análise.

Fluido	η_0	n_E	$\eta_{E \max}$	$\eta_{E \min}$
#5	$1,6 \times 10^8$	0,2	$2,0 \times 10^8$	$8,7 \times 10^6$
#6	$3,1 \times 10^{11}$	0,5	$5,0 \times 10^8$	$2,0 \times 10^7$

Tabela 4.3 – Parâmetros reológicos.

O gráfico abaixo ilustra a variação da viscosidade extensional com a taxa de deformação.

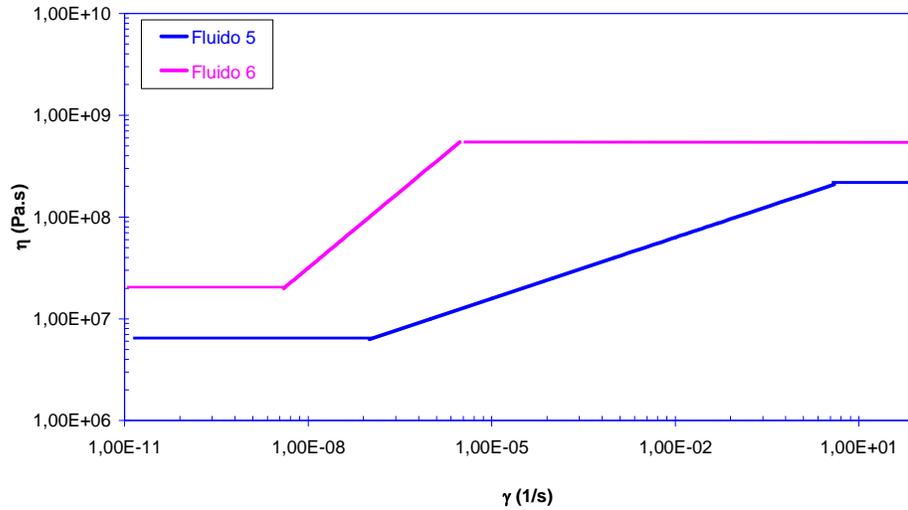


Fig. 4.22 – Variação da viscosidade extensiva.

Os três canais convergentes divergentes modelados têm as seguintes características:

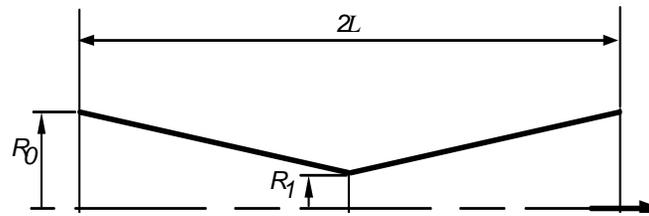


Fig. 4.23 – Geometria generalizada.

A tabela 4.4 lista as dimensões dos canais modelados:

Geometria	R_0	R_1	L
#A	0,075	0,025	0,15
#B	0,065	0,015	0,15
#C	0,075	0,015	0,075

Tabela 4.4 – Dimensões dos modelos matemáticos.

A tabela 4.5 mostra como os casos simulados foram nomeados de acordo com o fluido e a geometria.

Geometria / Fluido	# 5	# 6
A	Caso GAF5	Caso GAF6
B	Caso GBF5	Caso GBF6
C	Caso GCF5	Caso GCF6

Tabela 4.5 – Nomenclatura dos casos analisados.

A Fig.s a seguir apresentam os campos do classificador de escoamento R para as simulações com os fluidos 5 e 6 e geometrias A, B e C, respectivamente. É interessante observar que a geometria com inclinação mais acentuada gera regiões de extensão maiores do que as geometrias com inclinações mais suaves.

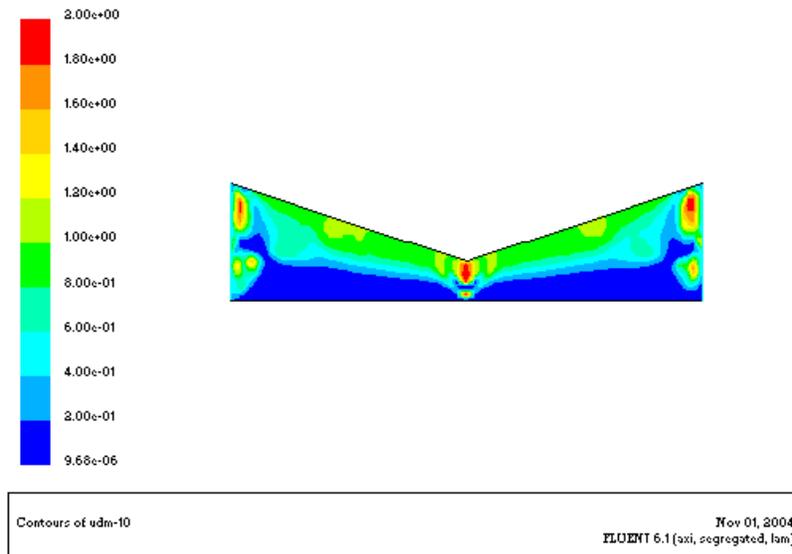


Fig. 4.24 – Campo do classificador R, Caso GAF5.

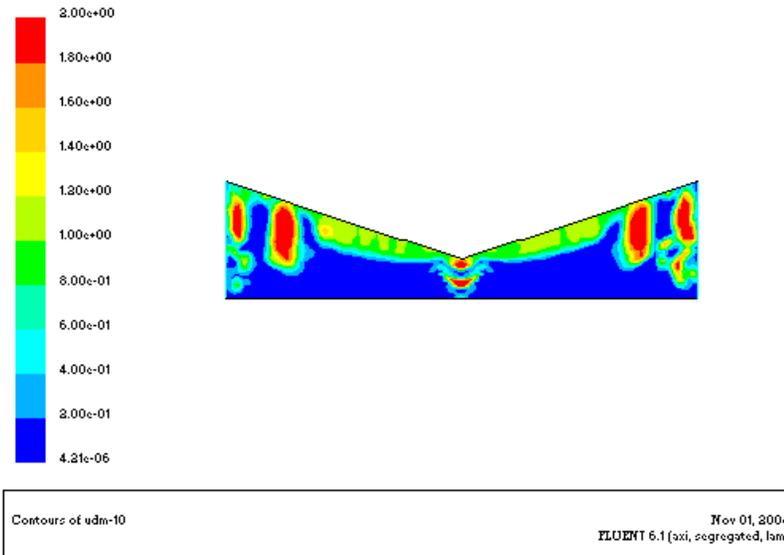


Fig. 4.25 – Campo do classificador R, Caso GAF6.

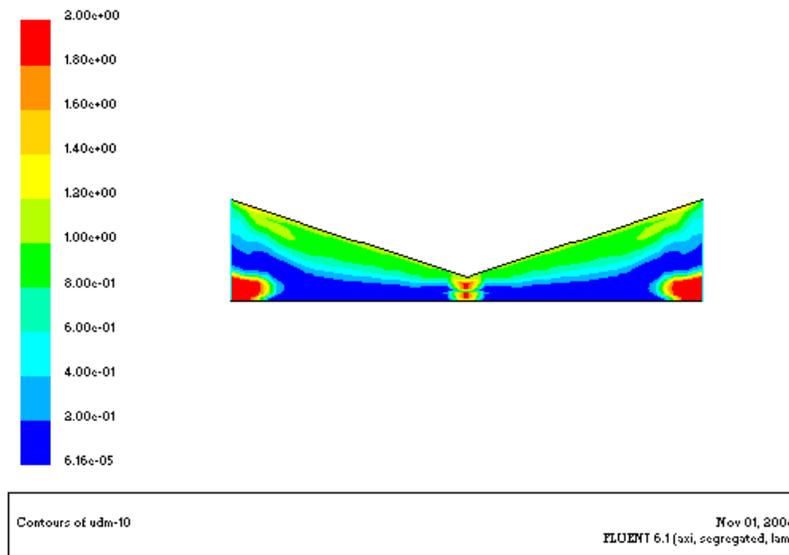


Fig. 4.26 – Campo do classificador R, Caso GBF5.

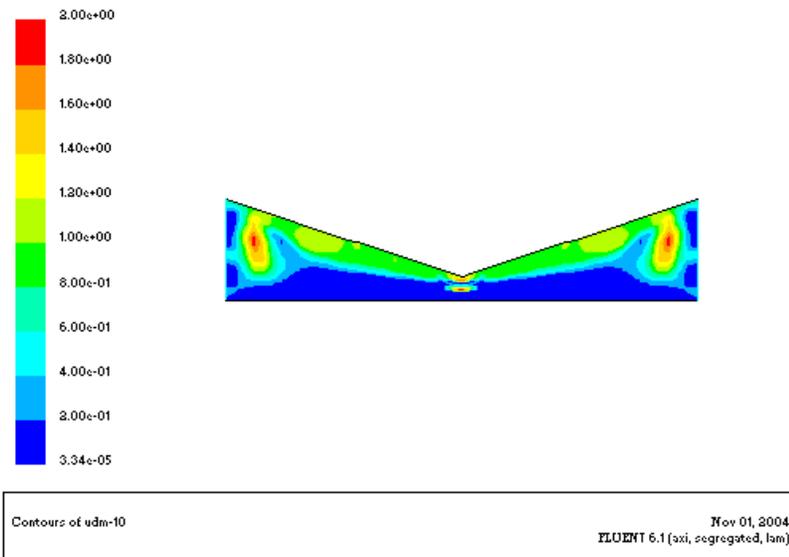


Fig. 4.27 – Campo do classificador R, Caso GBF6.

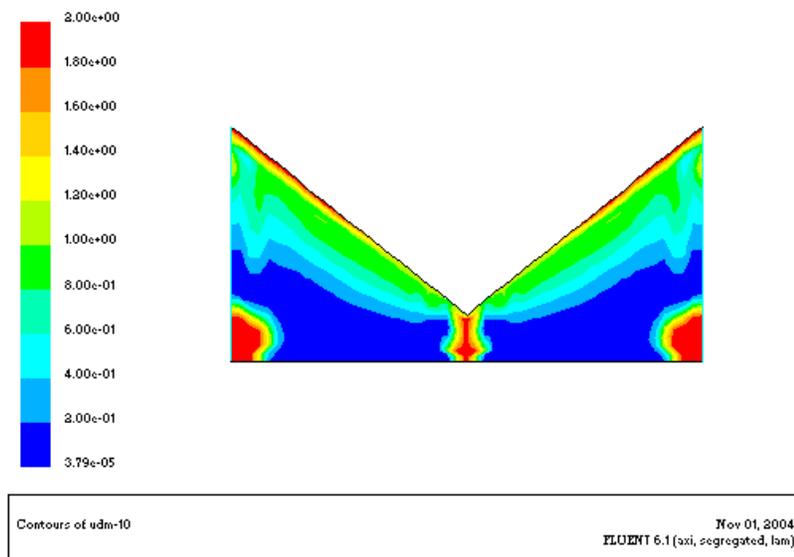


Fig. 4.28 – Campo do classificador R, Caso GCF5.

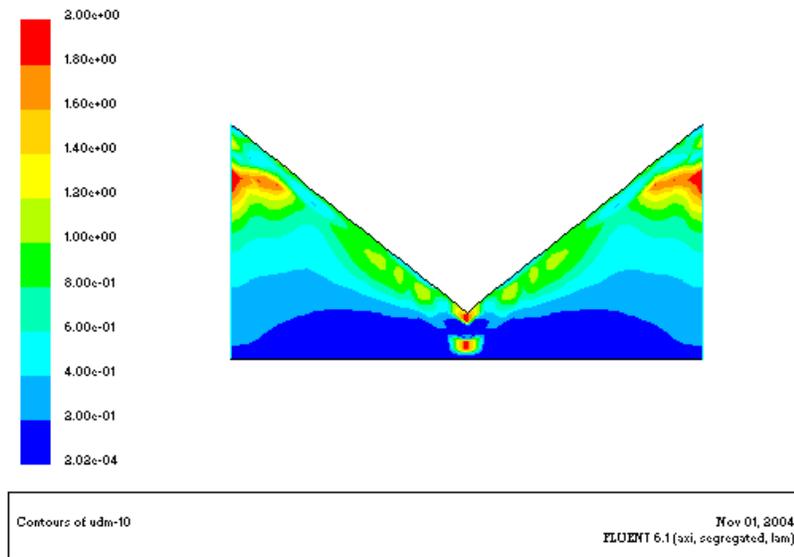


Fig. 4.29 – Campo do classificador R, Caso GCF6.

As Fig.s abaixo apresentam os campos de taxa de cisalhamento utilizados para o cálculo da viscosidade após a convergência.

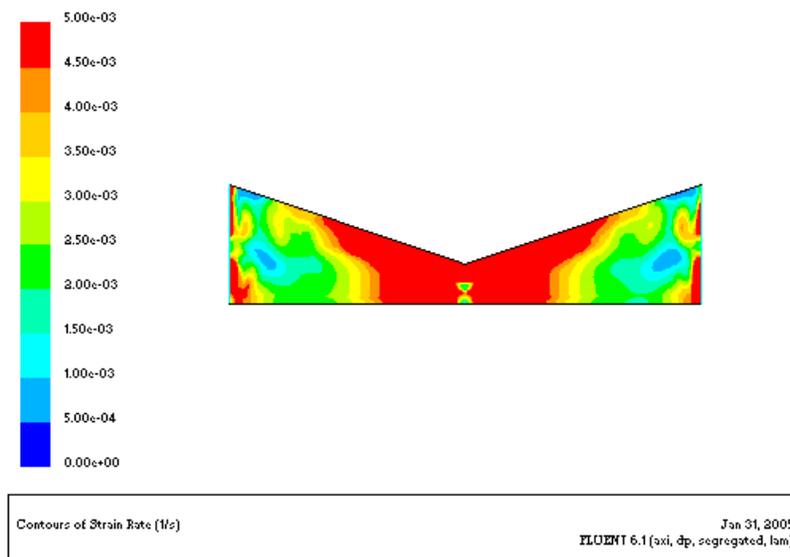


Fig. 4.30 – Campo da taxa de cisalhamento, Caso GAF5.

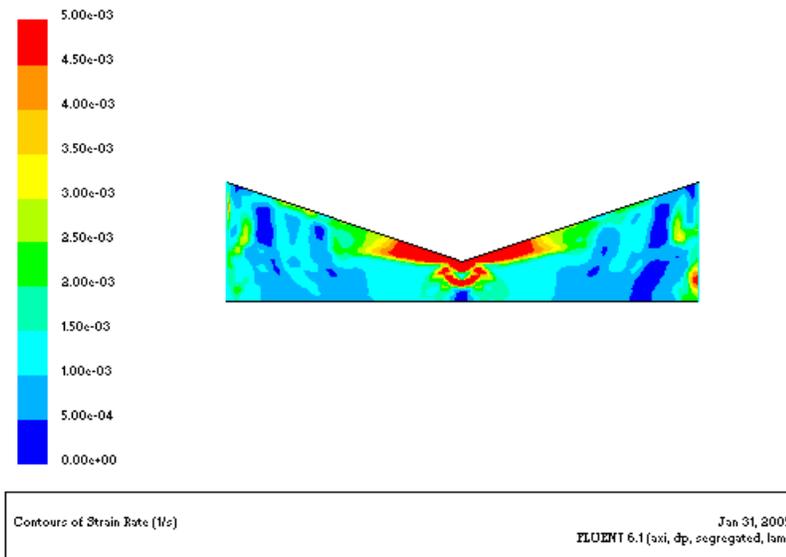


Fig. 4.31 – Campo da taxa de cisalhamento, Caso GAF6.

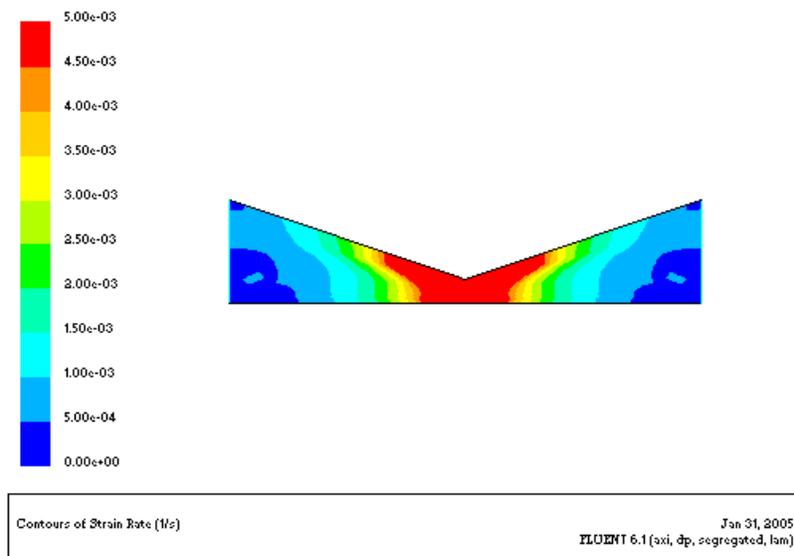


Fig. 4.32 – Campo da taxa de cisalhamento, Caso GBF5.

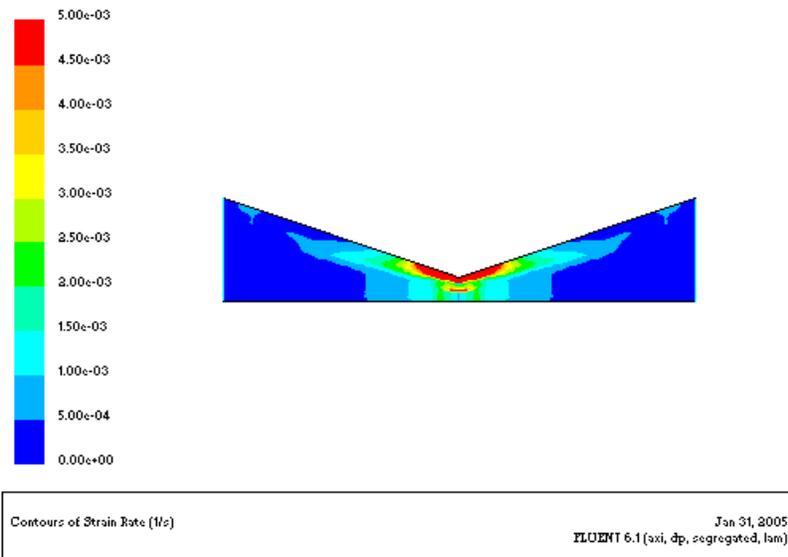


Fig. 4.33 – Campo da taxa de cisalhamento, Caso GBF6.

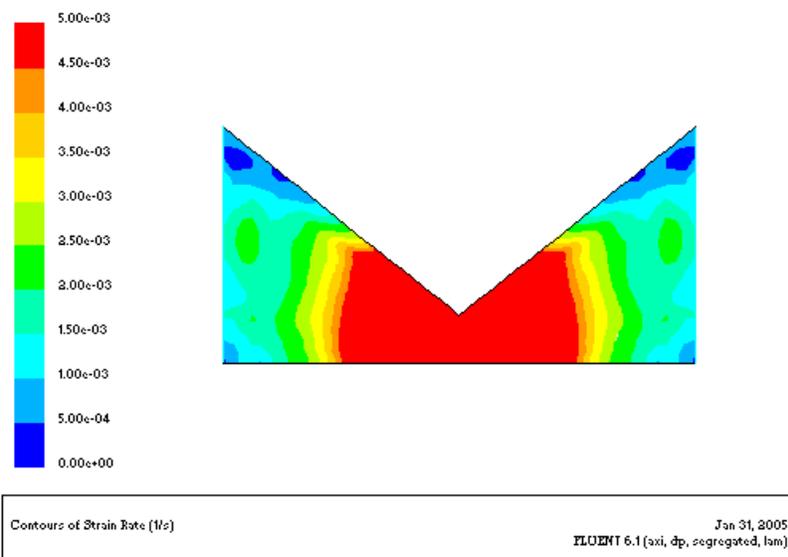


Fig. 4.34 – Campo da taxa de cisalhamento, Caso GCF5.

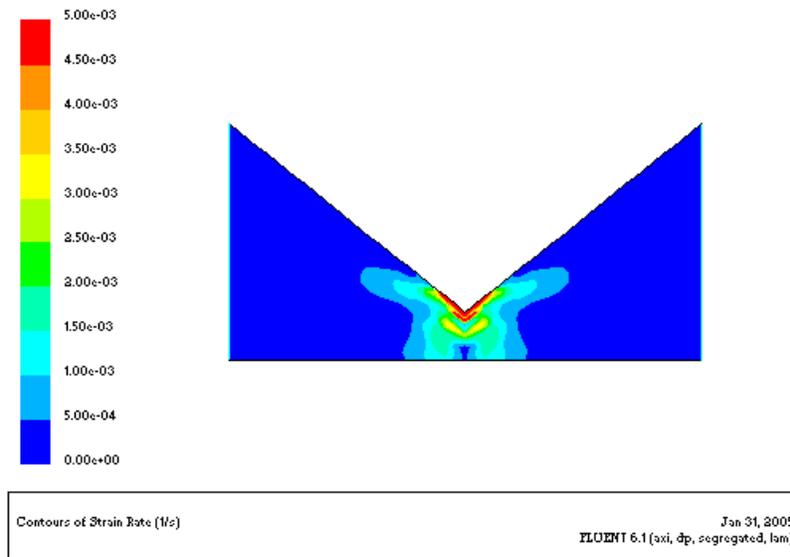


Fig. 4.35 – Campo da taxa de cisalhamento, Caso GCF6.

As Fig.s abaixo apresentam os campos de viscosidades após a convergência. Pode-se observar a maior característica extensiva do fluido # 6 (e portanto, maiores níveis de viscosidade) em relação ao fluido # 5, nas geometrias A e B.

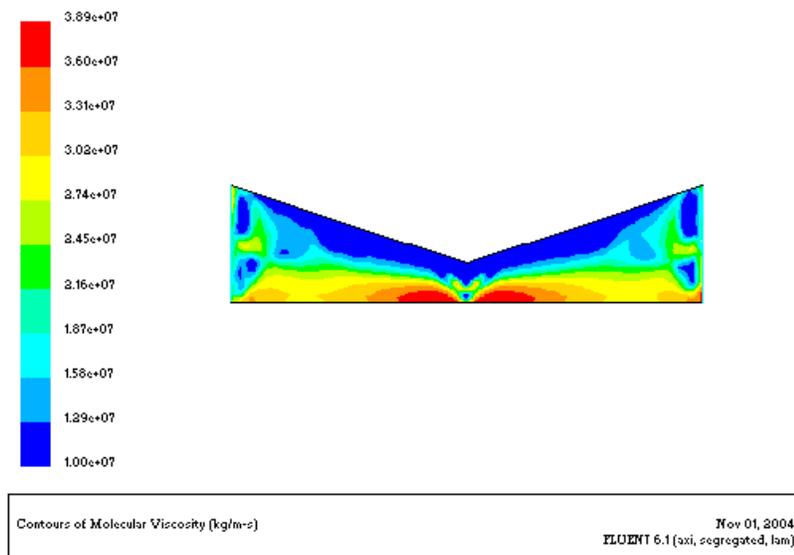


Fig. 4.36 – Campo da viscosidade, Caso GAF5.

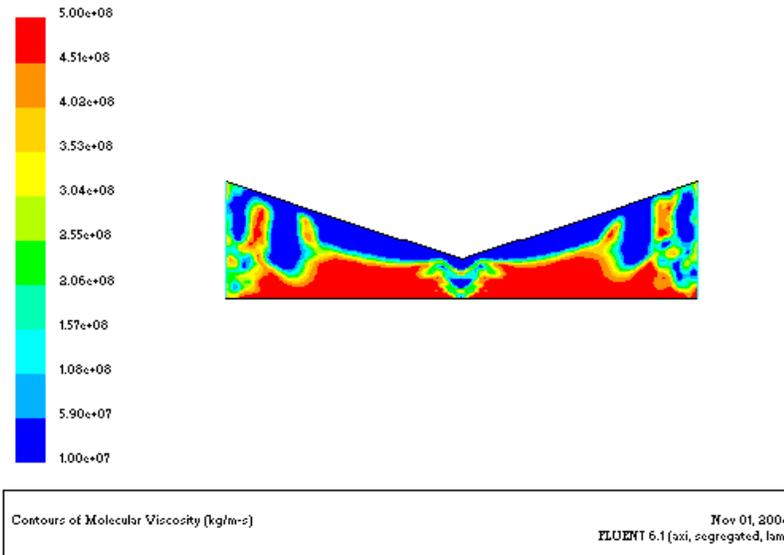


Fig. 4.37 – Campo da viscosidade, Caso GAF6.

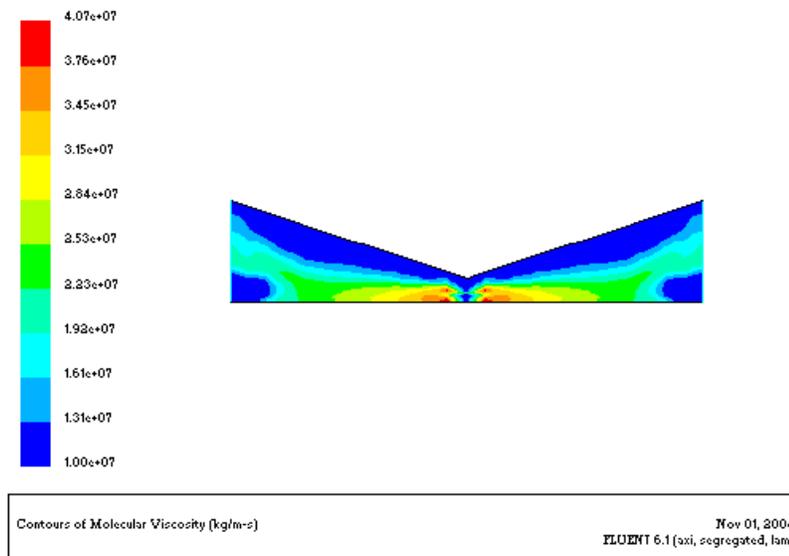


Fig. 4.38 – Campo da viscosidade, Caso GBF5.

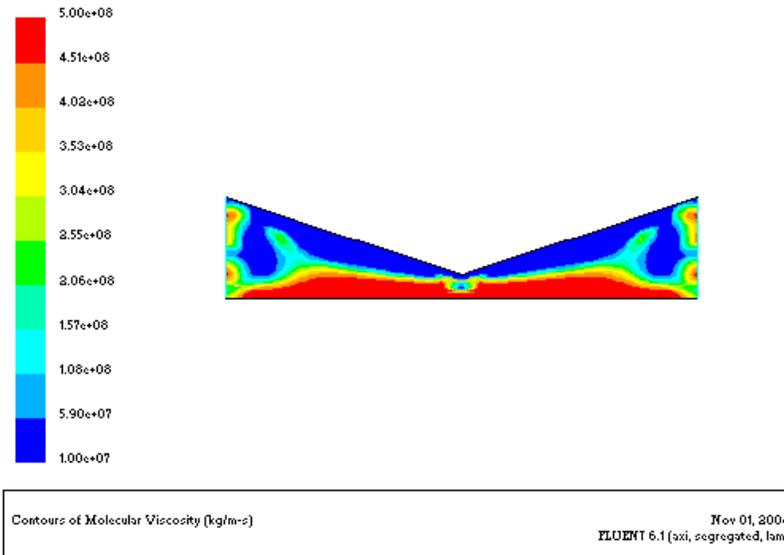


Fig. 4.39 – Campo de viscosidade, Caso GBF6.

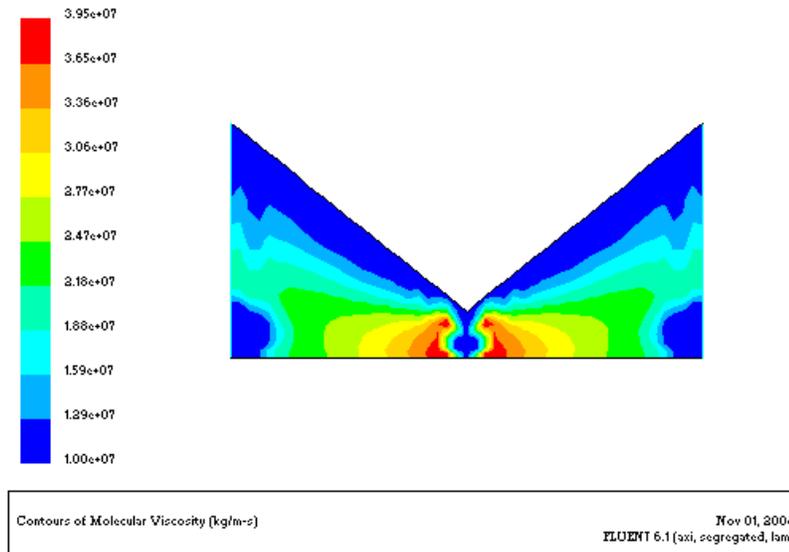


Fig. 4.40 – Campo da viscosidade, Caso GCF5.

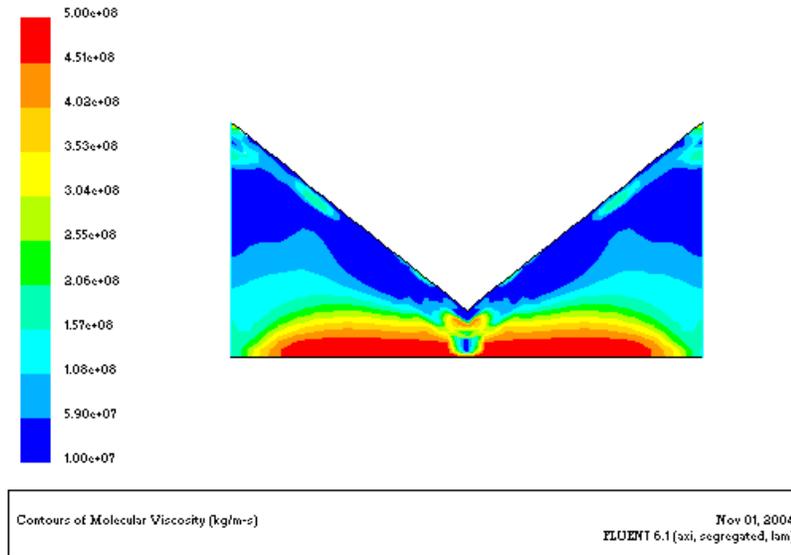


Fig. 4.41 – Campo de viscosidade, Caso GCF6.

Nos gráficos de linha de corrente mostrados a seguir pode-se notar que no caso GCF6 ocorre uma recirculação. Esta recirculação faz com que o fluido escoe somente pela região central, e fazendo com que o comportamento extensional seja menos forte do que o do fluido #5.

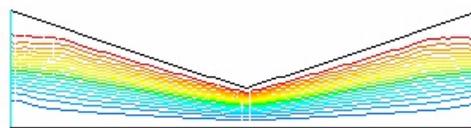
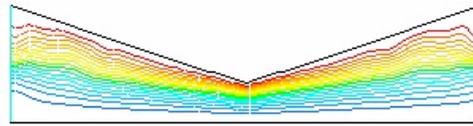


Fig. 4.42 – Linhas de corrente, Caso GAF5.



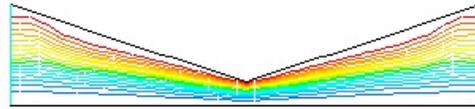
m Function (kg/s) Nov 27, 2004
FLUENT 6.1 (axi, segregated, lam)

Fig. 4.43 – Linhas de corrente, Caso GAF6.



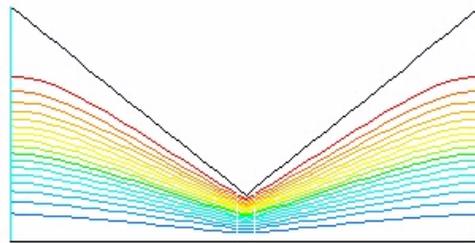
m Function (kg/s) Nov 27, 2004
FLUENT 6.1 (axi, segregated, lam)

Fig. 4.44 – Linhas de corrente, Caso GBF5.



m Function (kg/s) Nov 27, 2004
FLUENT 6.1 (axi, segregated, lam)

Fig. 4.45 – Linhas de corrente, Caso GBF6.



m Function (kg/s) Nov 27, 2004
FLUENT 6.1 (axi, segregated, lam)

Fig. 4.46 – Linhas de corrente, Caso GCF5.

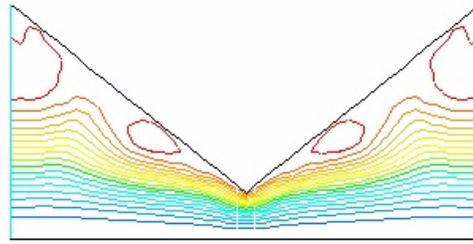


Fig. 4.47 – Linhas de corrente, Caso GCF6.

As Fig.s a seguir mostram os campos de velocidades para os casos analisados. Interessante notar que o fluido # 6 apresentou um perfil de velocidade semelhante ao caso do fluido 4, onde a velocidade máxima não ocorre na linha de centro, e sim entre a linha de centro e a parede da seção de menor diâmetro. Este pode ser um fenômeno que ocorre na prática, gerando um aumento considerável na perda de carga do escoamento. Porém a simulação numérica deste fenômeno é de difícil convergência utilizando a técnica proposta neste trabalho. O principal motivo é o *'looping'* de dependências, ou seja, a dependência da velocidade em relação ao campo de viscosidade, que por sua vez depende do campo do classificador R, que por sua vez depende do campo de velocidades, e assim por diante.

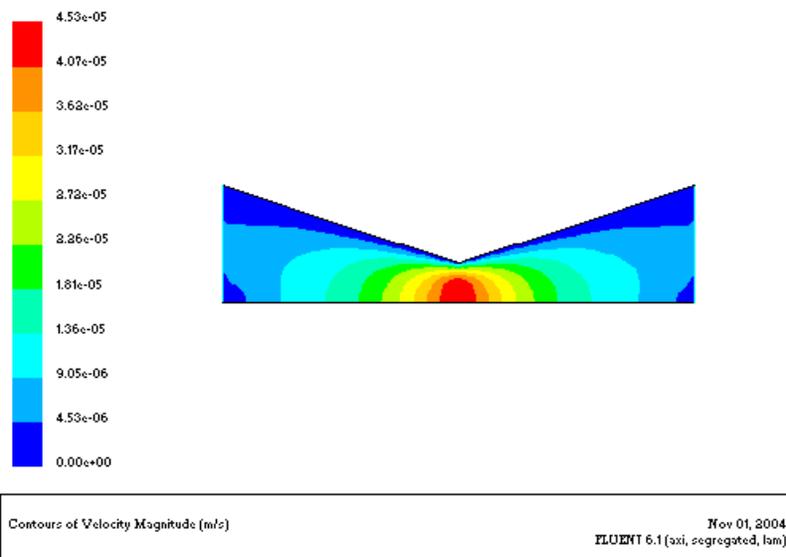


Fig. 4.48 – Campo de velocidade, Caso GAF5.

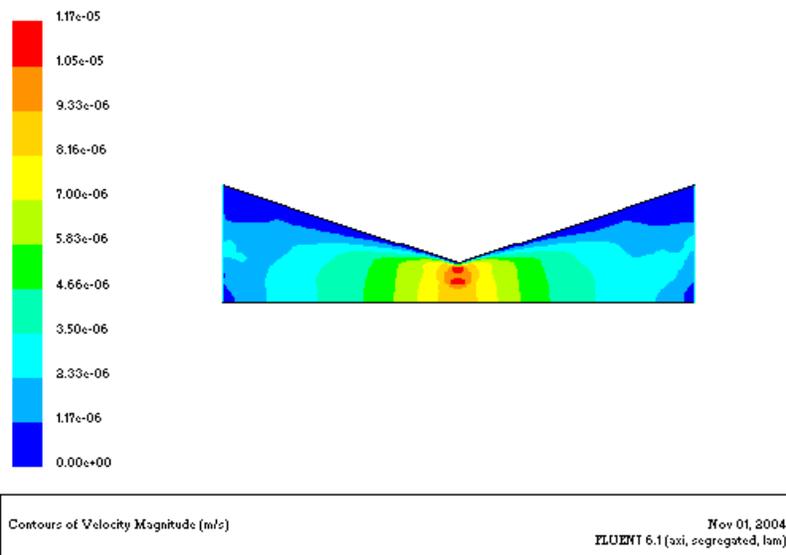


Fig. 4.49 – Campo de velocidade, Caso GAF6.

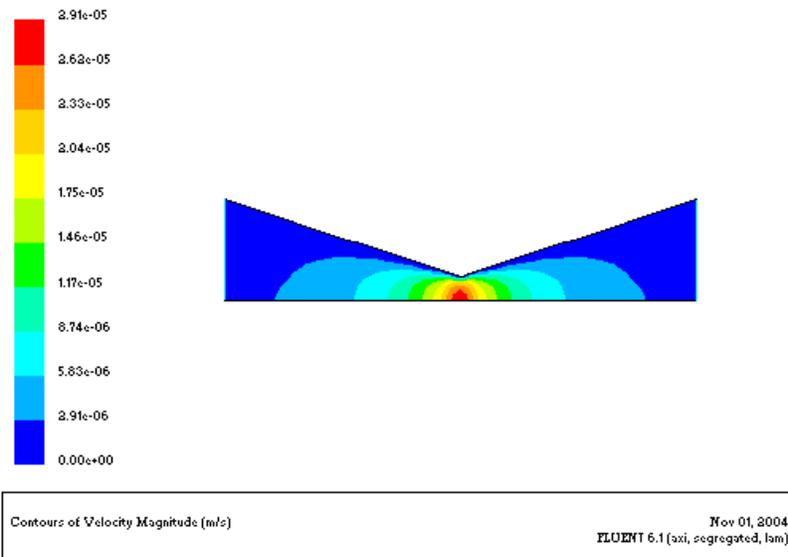


Fig. 4.50 – Campo de velocidade, Caso GBF5.

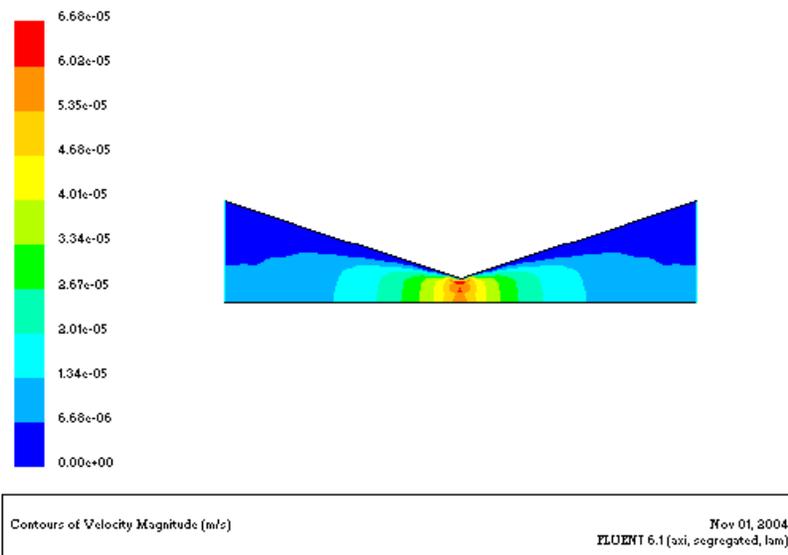


Fig. 4.51 – Campo de velocidade, Caso GBF6.

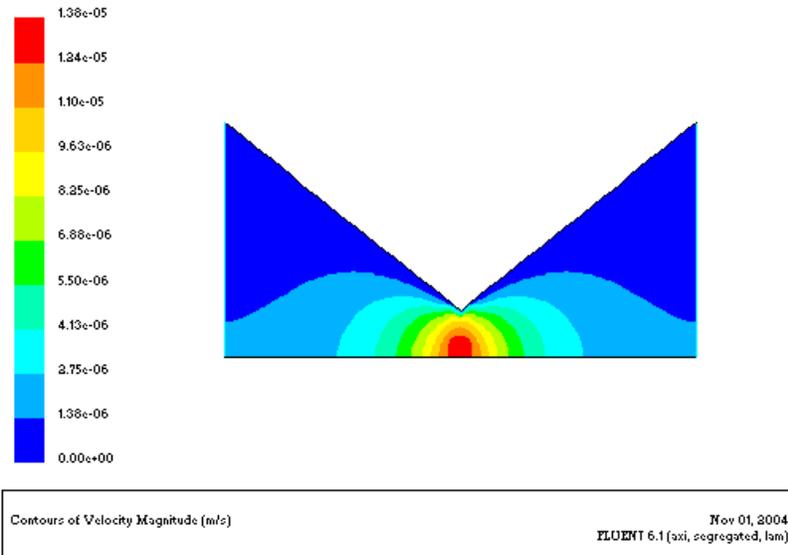


Fig. 4.52 – Campo de velocidade, Caso GCF5.

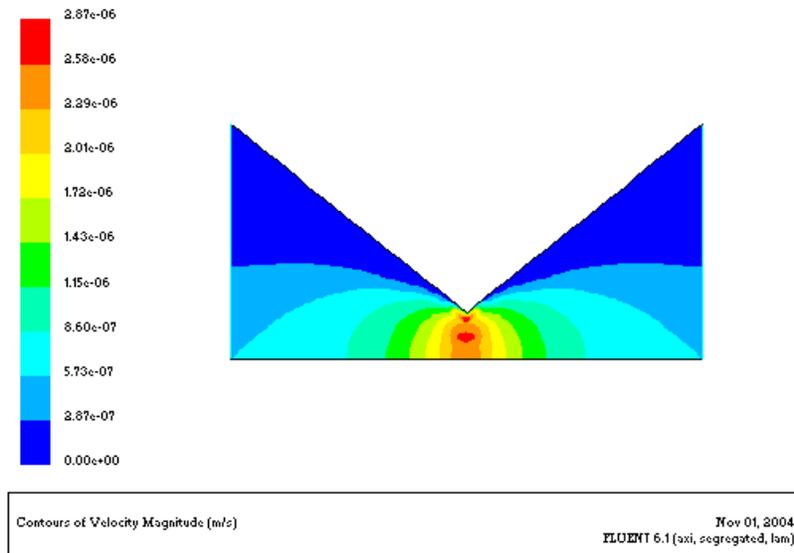


Fig. 4.53 – Campo de velocidade, Caso GCF6.

Os resultados numéricos de vazão e perda de pressão foram comparados com os resultados obtidos utilizando-se o modelo teórico para uma faixa de gradiente de pressão de 0 a 10^8 pascal/m. A tabela 5.6 lista os parâmetros numéricos e reológicos utilizado pra cálculo dos resultados teóricos.

Caso	η_0	n_E	R_0	R_1	L
GAF5	$1,6 \times 10^8$	0,2	0,075	0,025	0,15
GAF6	$3,1 \times 10^{11}$	0,5	0,075	0,025	0,15
GBF5	$1,6 \times 10^8$	0,2	0,065	0,015	0,15
GBF6	$3,1 \times 10^{11}$	0,5	0,065	0,015	0,15
GCF5	$1,6 \times 10^8$	0,2	0,075	0,015	0,15
GCF6	$3,1 \times 10^{11}$	0,5	0,075	0,015	0,075

Tabela 4.6 – Parâmetros geométricos e reológicos.

Os resultados obtidos mostram uma relação não linear entre a vazão e a queda de pressão para o fluido #5 e para o fluido #6, geometria C. A recirculação do escoamento nas regiões menos estreitas, fazendo com que o fluido # 6 escoe mais diretamente pelo centro explicaria este fenômeno. De qualquer maneira, pode-se afirmar que o comportamento qualitativo obtido com o fluido # 5 é similar ao previsto pelo modelo teórico, porém ainda existem diferenças quantitativas razoáveis.

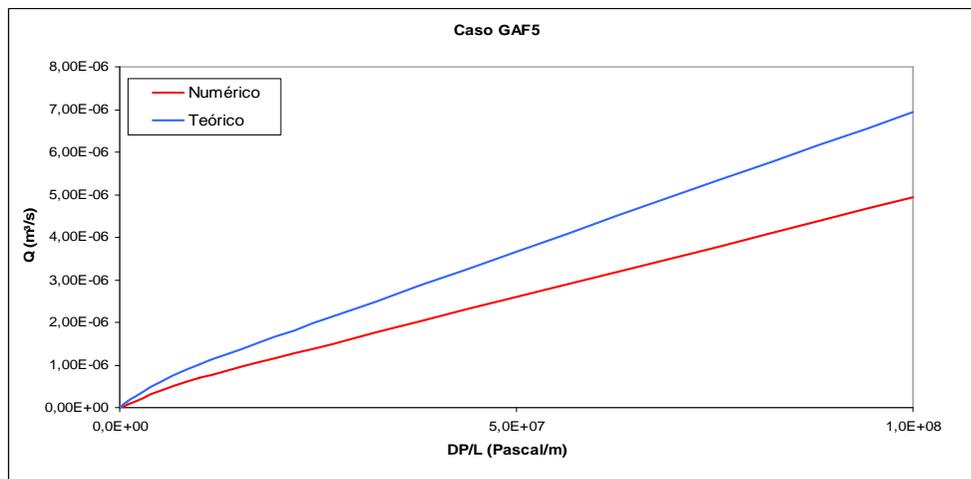


Fig. 4.54 – Comparação dos resultados Caso GAF5.

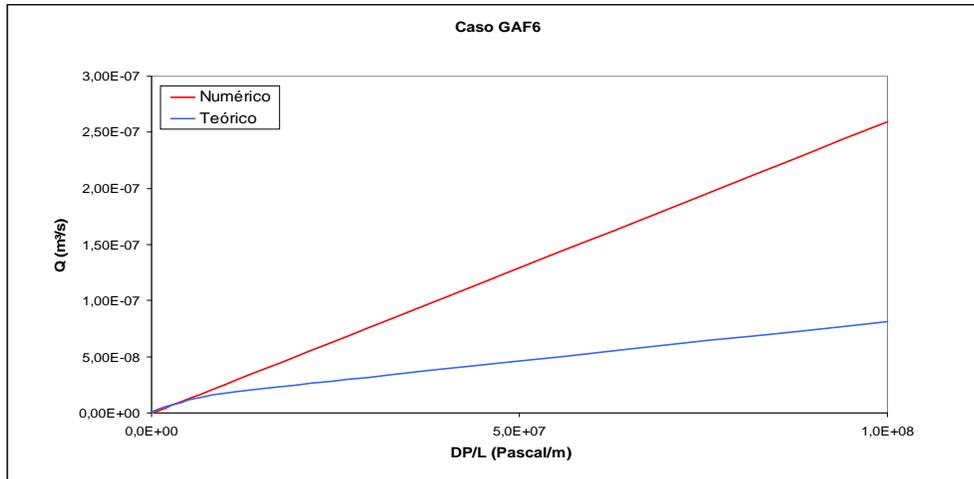


Fig. 4.55 – Comparação dos resultados Caso GAF6.

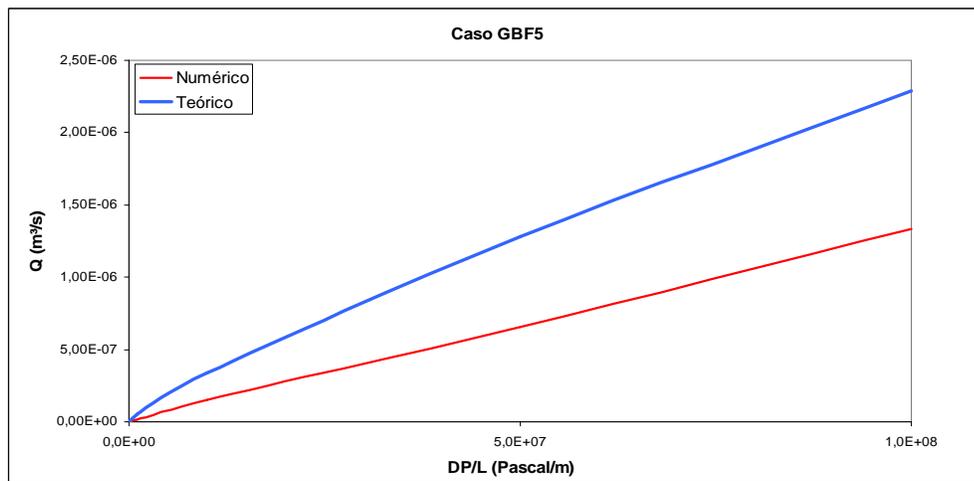


Fig. 4.56 – Comparação dos resultados Caso GBF5.

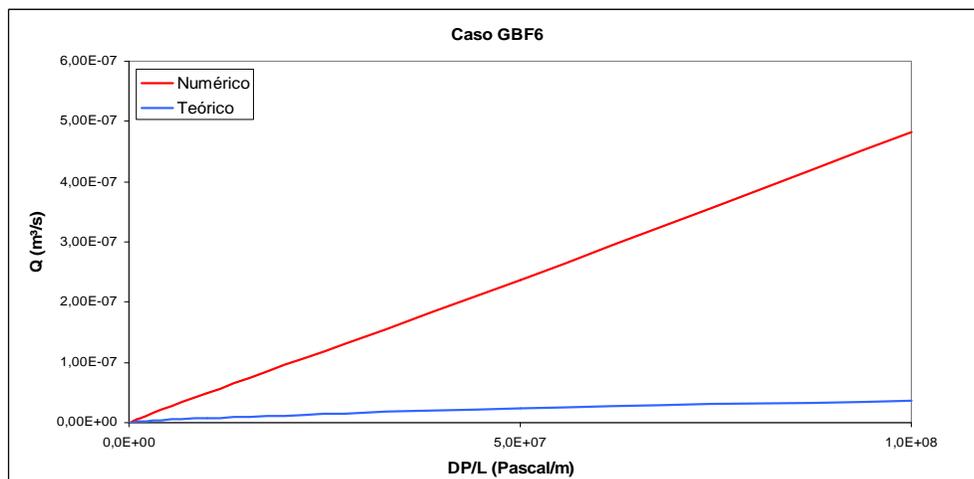


Fig. 4.57 – Comparação dos resultados Caso GBF6.

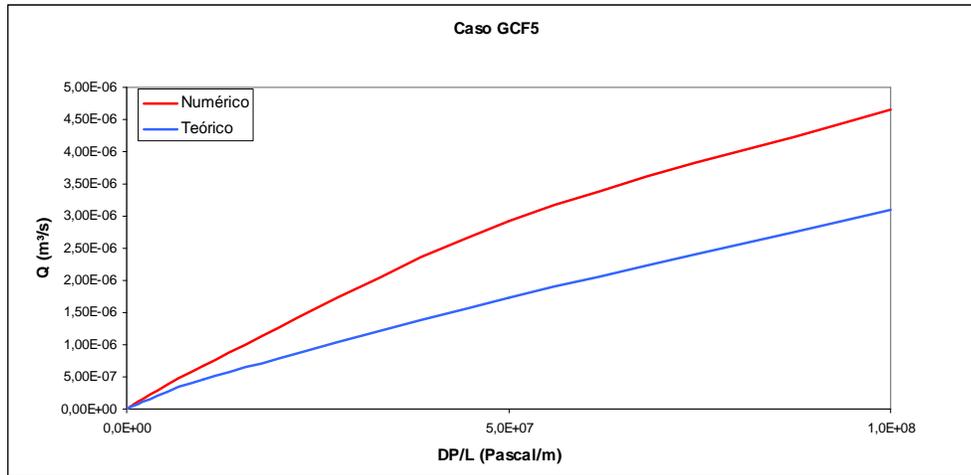


Fig. 4.58 – Comparação dos resultados Caso GCF5.

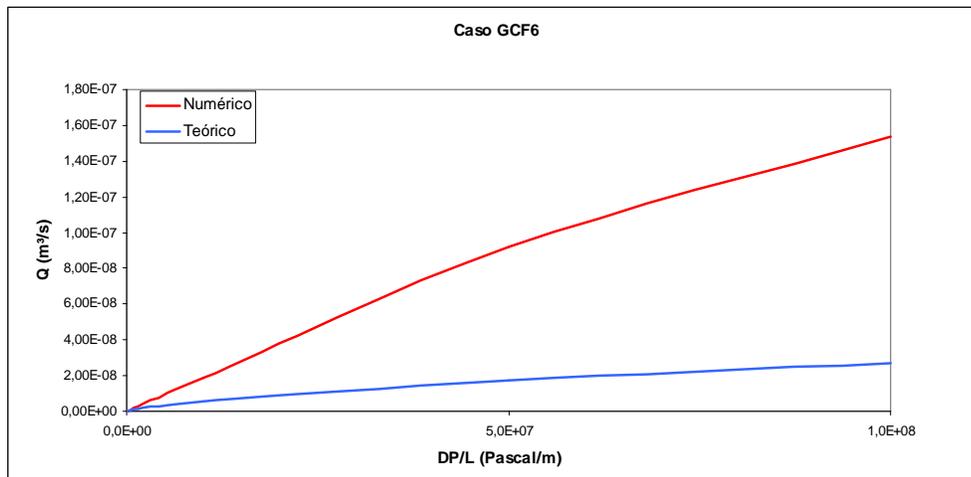


Fig. 4.59 – Comparação dos resultados Caso GCF6.