



**Bruno José Barreto Nassar**

**Escoamentos de Líquidos  
Elasto-Viscoplásticos através de uma  
Expansão-Contração Abrupta  
Axissimétrica**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientadores: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes  
Prof. Mônica Feijó Naccache

Rio de Janeiro  
Setembro de 2008



**Bruno José Barreto Nassar**

**Escoamentos de Líquidos Elasto-  
Viscoplásticos através de uma Expansão-  
Contração Abrupta Axissimétrica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Profa. Mônica Feijo Naccache**

Co-Orientadora

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Roney Leon Thompson**

Universidade Federal Fluminense

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Bruno José Barreto Nassar**

Bruno José Barreto Nassar, carioca, é aspirante a oficial da reserva e formado em engenharia mecânica e de automóveis pelo Instituto Militar de Engenharia - IME em novembro de 2005. Prestou serviço como engenheiro de processo na Intratec Consulting até Dezembro de 2006. Atualmente trabalha no Centro de Pesquisas da PETROBRAS - CENPES como engenheiro de equipamentos - mecânica desenvolvendo projeto térmico de permutadores de calor.

### Ficha Catalográfica

Nassar, Bruno José Barreto

Escoamentos de líquidos elasto-viscoplásticos através de uma expansão-contração abrupta axissimétrica / Bruno José Barreto Nassar ; orientadores: Paulo Roberto de Souza Mendes, Mônica Feijó Naccache. – 2008.

90 f. : il.(col.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Líquidos elasto-viscoplásticos. 3. Expansão-contração abrupta. 4. Região estruturada. I. Mendes, Paulo Roberto de Souza. II. Naccache, Mônica Feijó. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

## Agradecimentos

A Deus.

Ao professor Paulo Roberto e professora Mônica Naccache pelo apoio e orientação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

A minha esposa Daniela e meus pais Ana Maria, Léa e José Nassar pela paciência, dedicação, amor, carinho, altruísmo e imenso e contínuo incentivo ao estudo e capacitação profissional.

A Bremer, Lila, Pascoal e Radoman pela imensa amizade e descontração contagiante.

Aos meus familiares que me apoiaram das mais diversas formas.

A funcionária do departamento de engenharia mecânica da PUC-Rio Rosely pela ajuda com informações, prazos e paciência.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

## Resumo

Barreto Nassar, Bruno José; Souza Mendes, Paulo Roberto. **Escoamentos de Líquidos Elasto-Viscoplásticos através de uma Expansão-Contração Abrupta Axissimétrica**. Rio de Janeiro, 2008. 90p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Atualmente, o escoamento de fluidos não Newtonianos está presente em diversos processos industriais e também no dia-a-dia de todos. Na presente dissertação, inicialmente, é apresentada uma nova equação constitutiva capaz de modelar fluidos que possuam tanto elasticidade como viscoplasticidade, sendo este novo modelo definido como elasto-viscoplástico. Para a melhor compreensão do modelo, anteriormente, é realizada, uma breve revisão dos fluidos não Newtonianos, com maior ênfase para o modelo viscoplástico SMD e o modelo viscoelástico de Oldroyd-B, que possuem grande influência no novo modelo constitutivo. Em seguida é apresentada uma nova metodologia de adimensionalização levando-se em conta apenas os parâmetros reológicos neste processo, garantindo a independência das equações com relação a vazão. Por fim, é realizada a simulação deste novo modelo em um escoamento com uma expansão e contração abrupta. Nesta simulação, é analisado o comportamento do fluido ao passar por esta cavidade com relação às principais variáveis da equação constitutiva. A simulação foi realizada pelo método dos elementos finitos e os resultados mostram a influência do número de Deborah reológico, da velocidade, do expoente *power-law* e da razão entre os tempos de retardo e de relaxamento, na perda de carga e no padrão de escoamento.

## Palavras-chave

líquidos elasto-viscoplásticos; expansão-contração abrupta; região estruturada.

## Abstract

Barreto Nassar, Bruno José; Souza Mendes, Paulo Roberto. **Flow of Elasto-Viscoplastic Liquids Through an Abrupt Axisymmetric Expansion-Contraction**. Rio de Janeiro, 2008. 90p. Master Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Currently, the flow of non-Newtonian fluids is present in many industrial processes and also in day-to-day of all. In this dissertation, initially it is exposed a new constitutive equation capable of modeling fluids that present as much elasticity as viscoplasticity, and this new model is called as Elasto-viscoplastic. For better understanding of this model, previously, a brief review of non-Newtonian fluids is done, with a focus on the SMD viscoplastic model and on the Oldroyd-B viscoelastic model, both which have a great influence in this new constitution model. Afterward, a new methodology of non-dimensionalization is presented, taking into account only the rheological parameters in this process and ensuring the independence of equations with respect to flow. Finally, the simulation of this new model is performed in a flow within a abrupt expansion-contraction geometry. In this simulation, it is studied the behavior of the fluid through this cavity with respect to key variables of the constitutive equation. The simulation was carried out by the finite element method and, by the analysis of the results, it is shown the influence of the rheological Deborah, flow speed, the power-law exponent and the ratio of the time of retardation and relaxation on the head loss and the flow pattern.

## Keywords

elasto-viscoplastic liquids; abrupt expansion-contraction; yield surface

## Sumário

1 .Introdução	15
1.1. Motivação	15
1.2. Líquidos Não Newtonianos <i>Shear-Thinning</i>	18
1.3. Líquidos Não Newtonianos Viscoelásticos	20
1.4. Justificativas	23
1.5. Revisão da Literatura	23
2 .Modelagem	29
2.1. Geometria	29
2.2. Equações Governantes	29
2.3. Equações Constitutivas	31
2.3.1. SMD	31
2.3.2. Oldroyd-B	32
2.3.3. Souza Mendes	34
2.4. Adimensionalização	40
2.4.1. SMD adimensionalizado	40
2.4.2. Oldroyd-B	41
2.4.3. Souza Mendes	42
3 .Solução Numérica	44
3.1. Resolução do Problema pelo POLYFLOW	46
3.1.1. Definição da geometria e dependência temporal do escoamento	47
3.1.2. Escolha do modelo viscoelástico	47
3.1.3. Determinação do modelo de interpolação	50
3.1.4. Parâmetros numéricos	50
3.2. Testes e Escolha da Malha	53
3.2.1. Modelagem da Malha	53
3.2.2. Malhas Analisadas	54
3.2.3. Testes de Malha	56
4 .Resultados	60

4.1. Comparação entre Fluidos do tipo 1 e tipo 2	62
4.1.1. Perda de Carga - $\Delta p^*$	62
4.1.2. Eficiência de Deslocamento - $\varphi$	65
4.1.3. Assimetria – $A_s$	74
4.1.4. Volume <i>yielded</i>	80
5 .Considerações Finais	86
6 .Referências Bibliográficas	89



## Lista de figuras

Figura 1.1: Experimento para visualização do escoamento	16
Figura 1.2: Visualização dos experimentos	17
Figura 1.3: Comportamento de um fluido <i>shear-thinning</i>	19
Figura 1.4: Tensão x Tempo ao cessar a taxa de deformação $\dot{\gamma}$ em um fluido viscoelástico	21
Figura 1.5: Estrutura polimérica em repouso (esquerda) e sob efeito de tensões cisalhantes.	22
Figura 1.6: modelo elasto-viscoplástico de Pierre Saramito	28
Figura 2.1: Geometria do escoamento	29
Figura 2.2: Tensão em função da taxa de deformação no modelo SMD.	31
Figura 2.3: escoamento extensional biaxial	34
Figura 2.4: Função viscosidade no modelo Souza Mendes	36
Figura 3.1: Seqüência de passos para solução numérica de escoamentos não newtonianos	45
Figura 3.2: Geometria utilizada na simulação e parâmetros para a geração da malha	53
Figura 3.3: <i>malha003</i> com 2071 elementos	55
Figura 3.4: Detalhe do refinamento da <i>malha003</i> na entrada da cavidade	55
Figura 3.5: <i>malha005</i> com 1018 elementos	55
Figura 3.6: Detalhe do refinamento da <i>malha005</i> na entrada da cavidade	56
Figura 3.7: Exemplo da pressão em função do eixo x da geometria do escoamento	57
Figura 3.8: a) Análise da interface com precisão do <i>TECPLOT</i> de $10^{-5}$ . b) detalhe da interface.	58
Figura 3.9: a) Análise da interface com precisão do <i>TECPLOT</i> de $10^{-4}$ . b) detalhe da interface.	59
Figura 4.1: $\Delta p * X De_R$ para os fluidos 11 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0$ ) e 21 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0$ )	63
Figura 4.2: $\Delta p * X De_R$ para os fluidos 12 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0,125$ ) e 22 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0,125$ )	63
Figura 4.3: $\Delta p * X De_R$ para os fluidos 13 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0,3$ ) e 23 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0,3$ )	64

Figura 4.4: $\Delta p \cdot X$ Velocidade para $De_R$ 1,5	65
Figura 4.5: Influência de $n$ na relação Viscosidade $\times \dot{\gamma}$	67
Figura 4.6: Detalhe da figura 20	68
Figura 4.7: $\phi \cdot X De_R$ para os fluidos 11 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0$ ) e 21 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0$ )	69
Figura 4.8: $\phi \cdot X De_R$ para os fluidos 12 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0,125$ ) e 22 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0,125$ )	69
Figura 4.9: $\phi \cdot X De_R$ para os fluidos 13 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0,3$ ) e 23 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0,3$ )	70
Figura 4.10: $\phi \cdot X De_R$ para velocidade de entrada 3	70
Figura 4.11: $\phi \cdot X De_R$ para velocidade de entrada 5	71
Figura 4.12: $\phi \cdot X De_R$ para velocidade de entrada 10	71
Figura 4.13: $\phi \cdot X De_R$ para velocidade de entrada 15	72
Figura 4.14: $\phi \cdot X$ Velocidade de Entrada para $De_R$ 0	72
Figura 4.15: $\phi \cdot X$ Velocidade de Entrada para $De_R$ 1,5	73
Figura 4.16: $\phi \cdot X$ Velocidade de Entrada para $De_R$ 2,5	73
Figura 4.17: Tensão Viscosa	75
Figura 4.18: Tensão Elástica	75
Figura 4.19: Tensão Total	76
Figura 4.20: $As \cdot X De_R$ para os fluidos 11 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0$ ) e 21 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0$ )	77
Figura 4.21: $As \cdot X De_R$ para os fluidos 12 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0,125$ ) e 22 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0,125$ )	77
Figura 4.22: $As \cdot X De_R$ para os fluidos 13 ( $n=0,5$ e $\eta_r=0,3$ ) e 23 ( $n=0,8$ e $\eta_r=0,3$ )	78
Figura 4.23: $As \cdot X$ Velocidade de entrada 3	78
Figura 4.24: $As \cdot X$ Velocidade de entrada 5	79
Figura 4.25: $As \cdot X$ Velocidade de entrada 10	79
Figura 4.26: $As \cdot X$ Velocidade de entrada 15	80
Figura 4.27: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 11 com velocidade igual a 3 e De igual a 0; 1,5; 2,5 .	80
Figura 4.28: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 11 com velocidade igual a 5 e De igual a 0; 1,5; 2,5.	81
Figura 4.29: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 11 com velocidade igual a 10 e De igual a 0; 1,5; 2,5.	81
Figura 4.30: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 11 com velocidade igual a 15 e	

De igual a 0; 1,5.	81
Figura 4.31: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 12 com velocidade igual a 3 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	81
Figura 4.32: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 12 com velocidade igual a 5 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	82
Figura 4.33: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 12 com velocidade igual a 10 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5 ..	82
Figura 4.34: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 12 com velocidade igual a 15 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	82
Figura 4.35: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 13 com velocidade igual a 3 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	82
Figura 4.36: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 13 com velocidade igual a 5 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	82
Figura 4.37: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 13 com velocidade igual a 10 e	
De igual a 0; 1,5; 2,3.	83
Figura 4.38: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 13 com velocidade igual a 15 e	
De igual a 0; 1,5; 2,3.	83
Figura 4.39: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 21 com velocidade igual a 3 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	83
Figura 4.40: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 21 com velocidade igual a 5 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	83
Figura 4.41: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 21 com velocidade igual a 10 e	
De igual a 0; 1,5; 2,125.	84
Figura 4.42: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 21 com velocidade igual a 15 e	
De igual a 0; 1,5; 2.	84
Figura 4.43: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 22 com velocidade igual a 3 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	84
Figura 4.44: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 22 com velocidade igual a 5 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	84
Figura 4.45: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 22 com velocidade igual a 10 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	84
Figura 4.46: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 22 com velocidade igual a 15 e	

De igual a 0; 1,5; 2,5.	85
Figura 4.47: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 23 com velocidade igual a 3 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	85
Figura 4.48: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 23 com velocidade igual a 5 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	85
Figura 4.49: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 23 com velocidade igual a 10 e	
De igual a 0; 1,5; 2.	85
Figura 4.50: $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ no fluido 23 com velocidade igual a 15 e	
De igual a 0; 1,5; 2,5.	85

## Lista de tabelas

Tabela 3.1: Parâmetros de divisão das malhas	55
Tabela 3.2: Resultados dos Testes de Malha	57
Tabela 3.3: Diferença Percentual entre os Resultados do Teste de Malha	58
Tabela 4.1: Resumo do código para um fluido XY.	61
Tabela 5.1: Resultado qualitativo das simulações	87

*“A vida sem ciência é uma espécie de morte”.*

Sócrates

*“A imaginação é mais importante que o conhecimento”.*

Albert Einstein

*“Nenhuma grande descoberta foi feita jamais sem um palpite ousado”.*

Isaac Newton