

Luiz Antônio Reis Júnior

**Escoamento de Materiais Viscopoplásticos
Através de uma Expansão-Contração Abrupta**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Orientadora: Prof. Mônica Feijó Naccache
Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Julho de 2003

Luiz Antônio Reis Júnior

Escoamento de Materiais Viscopoplásticos Através de uma Expansão-Contração Abrupta

Dissertação apresentada ao Departamento de
Engenharia Mecânica da PUC-Rio como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Mestre em
Ciências em Engenharia Mecânica

Prof. Mônica Feijó Naccache

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Julho de 2003

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

Luiz Antônio Reis Júnior

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-RJ, em 1990, cursou o MBA em Gerência de Energia pela Fundação Getúlio Vargas do Rio de Janeiro, FGV-RJ, em 2001/02. Trabalhou em empresas de montagem industrial na área de petróleo e energia nuclear.

Ficha catalográfica

Reis Júnior, Luiz Antônio

Escoamento de Materiais Viscoplasticos Através de uma Expansão-Contração Abrupta, Luiz Antônio Reis Júnior; orientadora: Mônica Feijó Naccache.- Rio de Janeiro : Departamento de Engenharia Mecânica, 2003.

86 f.: il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Reologia. 3. Escoamento de fluidos não Newtonianos. I. Naccache, Mônica Feijó. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD:621



Luiz Antônio Reis Júnior

**Escoamento de Materiais Viscoplasticos Através
de uma Expansão-Contração Abrupta**

Dissertação apresentada ao Departamento de
Engenharia Mecânica da PUC-Rio como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Mestre em
Ciências em Engenharia Mecânica

Prof^a. Mônica Feijó Naccache

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof^a. Angela Ourivio Nieckele

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Julho de 2003.

À minha família.

Agradecimentos

A Prof. Monica Naccache, pelo apoio, estímulo e orientação.

Devo agradecer, também, aos demais professores do Departamento de Engenharia Mecânica que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica, pela oportunidade de cursar o mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica, em especial à Rosely, Carlúcio, Leninaldo e Christiano.

Aos colegas Henriete, Marcius, André, Marcos, Bruno, Renata, Rafael, Oscar, Sueli, Márcio, Marcelo, Roney, Alexandre, Edgar, Erik, Joel e Eduardo pelo apoio e companheirismo nos momentos decisivos desta jornada.

A minha Eleonora, pelo amor, carinho, apoio, paciência e compreensão durante toda trajetória deste trabalho.

Aos meus pais Luiz Antônio e Maristela, por servirem de exemplo e estímulo em toda a minha trajetória.

Aos meus queridos familiares e amigos, que me apoiaram nesta jornada das mais variadas maneiras.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

Resumo

Escoamento de Materiais Viscoplasticos Através de uma Expansão-Contração Abrupta

Escoamentos de fluidos viscoplasticos através de expansões e contrações são encontrados em diversos processos industriais. Neste trabalho é feita a simulação numérica do escoamento de um fluido viscoplastico através de uma expansão abrupta axisimétrica seguida de uma contração. Resultados experimentais mostram que em certas condições para este tipo de escoamento pode surgir uma região estacionária do fluido, causado uma fratura do material entre esta região e a região de escoamento. Um dos objetivos deste trabalho é verificar se o modelo constitutivo usado na simulação numérica pode prever este tipo de comportamento. Outro objetivo é investigar os efeitos dos parâmetros geométricos e reológicos nos padrões de escoamento. A solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento é obtida usando o método de volumes finitos. Para modelar o comportamento não Newtoniano do fluido, é utilizada a equação constitutiva de Fluido Newtoniano Generalizado. Duas diferentes equações são utilizadas para a função viscosidade: o modelo de Carreau-Yasuda e o modelo de Herschel-Bulkley. A solução numérica fornece os campos de velocidade, viscosidade e pressão. Observa-se que existe uma transição no padrão de escoamento quando o comprimento do duto central (que é o de maior diâmetro) aumenta. Para baixos valores da razão entre o comprimento e o diâmetro do duto central, o material viscoplastico parece fraturar perto da região central do escoamento. Para valores maiores desta mesma razão, o padrão de escoamento dos materiais viscoplasticos tem o mesmo comportamento qualitativo ao de um fluido Newtoniano, não sendo observado nenhuma fratura.

Palavras-chave: reologia, materiais viscoplastico.

Abstract

Flow of Viscoplastic Materials Through an Expansion and Contraction

Flow of viscoplastic fluids through expansions and contractions are found in several industrial processes. In this work, a numerical simulation of a viscoplastic fluid flow through a sudden axysimetric expansion followed by a contraction is performed. Experimental results show that under certain conditions, for this kind of flow a stagnant flow region may appear in certain conditions, causing a material fracture between this region and the flow region. One of the goals of this work is to verify if the constitutive model used in the numerical simulation can predict this kind of behavior. The effects of rheological and geometrical parameters on flow patterns are also investigated. The numerical solution of conservation equations of mass and momentum is obtained via finite volume method. In order to model the non-Newtonian behavior of the fluid, it is used the Generalized Newtonian Fluid constitutive equation. Two different equations for the viscosity function are used: the Carreau-Yasuda model and the Herschel-Bulkley model. The numerical solution gives the velocity, viscosity and pressure fields. It is observed that there is a flow pattern transition as the length of the central duct (which is the one with larger diameter) is increased. For low values of the ratio between the length and diameter of the central duct, the viscoplastic material seems to fracture near the core region of the flow. For larger values of the same ratio, the viscoplastic materials flow pattern has the same qualitative behavior of that one that occurs for Newtonian fluids, and no fracture is observed.

Key-words: rheology, viscoplastic materials,

Sumário

1. Introdução	16
1.1 Motivação	16
2. Revisão Bibliográfica	21
3. Formulação Matemática	25
3.1 Descrição do problema	25
3.2 Equacionamento	25
3.3 Condições de contorno	30
3.4 Adimensionalização	31
4. Formulação Numérica	34
4.1 Método de volumes finitos	34
4.2 Discretização da equação geral	36
4.3 Definição da malha utilizada	37
5. Resultados	43
5.1 Comparativo de dois escoamentos para $D/d = 6$ e $D/d = 10$	45
5.2 Influência da razão de aspecto (L/D) no escoamento	65
5.3 Influência individual dos parâmetros reológicos no modelo Carreau-Yasuda	72
5.3.1 Gráficos comparativos da influência dos parâmetros estudadas com o caso base	72
5.3.2 Caso base	73
5.3.3 Influência da constante de tempo λ	75
5.3.4 Influência do expoente n	77
5.3.5 Influência da viscosidade a baixas taxas de deformação η_0	80
5.3.6 Comparativo de perfis de velocidade no centro da expansão	81
6. Considerações Finais	83

Lista de Ilustrações

Figura 3.1 - Geometria do problema analisado.	25
Figura 4.1 - Volume de controle típico.	35
Figura 4.2 - Sub-regiões da geometria estudada.	38
Tabela 4.1 - Malhas testadas.	39
Figura 4.3 - Perfil de velocidade na posição $L_0+0,5L$.	39
Figura 4.4 - Perfil de velocidade na posição $L_0+0,75L$.	40
Figura 4.5 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para um fluido Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$ usando a malha 2.	41
Figura 4.6 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para um fluido Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$ usando a malha 4.	41
Figura 4.7 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para um fluido Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$ usando a malha 2.	42
Figura 4.8 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para um fluido Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$ usando a malha 4.	42
Figura 5.1 - Funções viscosidade para o fluido 1.	44
Figura 5.2 - Funções viscosidade para o fluido 2.	45
Figura 5.3 - Perfil de velocidades na expansão para o fluido 1, $L/D = 0,5$, $D/d = 6$, para os modelos de Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley.	47
Figura 5.4 - Perfil de velocidades no tubo de saída para o fluido 1, $L/D = 0,5$, $D/d = 6$, para os modelos de Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley.	47
Figura 5.5 - Linha de corrente para o fluido 1, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	48
Figura 5.6 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 1, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	48
Figura 5.7 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 1, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	49
Figura 5.8 - Linha de corrente para o fluido 1, Herschel-Bulkley e $D/d = 6$.	49

Figura 5.9 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 1, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	50
Figura 5.10 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 1, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	50
Figura 5.11 - Perfil de velocidades na expansão para o fluido 1, $L/D = 0,5$, $D/d = 10$, para os modelos de Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley.	51
Figura 5.12 - Perfil de velocidades no tubo de saída para o fluido 1, $L/D = 0,5$, $D/d = 10$, para os modelos de Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley.	52
Figura 5.13 - Linha de corrente para o fluido 1, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	52
Figura 5.14 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 1, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	53
Figura 5.15 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 1, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	53
Figura 5.16 - Linha de corrente para o fluido 1, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	54
Figura 5.17 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 1, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	54
Figura 5.18 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 1, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	55
Figura 5.19 - Perfil de velocidades na expansão para o fluido 2, $L/D = 0,5$, $D/d = 6$, para os modelos de Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley.	56
Figura 5.20 - Perfil de velocidades no tubo de saída para o fluido 2, $L/D = 0,5$, $D/d = 6$, para os modelos de Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley.	56
Figura 5.21 - Linha de corrente para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	57
Figura 5.22 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	57
Figura 5.23 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	58

Figura 5.24 - Linha de corrente para o fluido 2, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	58
Figura 5.25 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 2, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	59
Figura 5.26 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 2, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 6$.	59
Figura 5.27 - Perfil de velocidades na expansão para o fluido 2, $L/D = 0,5$, $D/d = 10$, para os modelos de Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley.	61
Figura 5.28 - Perfil de velocidades no tubo de saída para o fluido 2, $L/D = 0,5$, $D/d = 10$, para os modelos de Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley.	61
Figura 5.29 - Linha de corrente para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	62
Figura 5.30 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	62
Figura 5.31 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	63
Figura 5.32 - Linha de corrente para o fluido 2, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	63
Figura 5.33 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 2, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	64
Figura 5.34 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 2, Herschel-Bulkley, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	64
Figura 5.35 - Linha de corrente para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,6$ e $D/d = 6$.	65
Figura 5.36 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,6$ e $D/d = 6$.	66
Figura 5.37 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,6$ e $D/d = 6$.	66
Figura 5.38 - Linha de corrente para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 1$ e $D/d = 6$.	67
Figura 5.39 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 1$ e $D/d = 6$.	67

Figura 5.40 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 1$ e $D/d = 6$.	68
Figura 5.41 - Linha de corrente para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,6$ e $D/d = 10$.	69
Figura 5.42 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,6$ e $D/d = 10$.	69
Figura 5.43 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,6$ e $D/d = 10$.	70
Figura 5.44 - Linha de corrente para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 1$ e $D/d = 10$.	70
Figura 5.45 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 1$ e $D/d = 10$.	71
Figura 5.46 - Campo da taxa de deformação (s^{-1}) para o fluido 2, Carreau-Yasuda, $L/D = 1$ e $D/d = 10$.	71
Figura 5.47 - Influência dos parâmetros reológicos na função viscosidade.	73
Figura 5.48 - Linha de corrente para caso base, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	74
Figura 5.49 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o caso base, Carreau-Yasuda, $L/D = 0,5$ e $D/d = 10$.	74
Figura 5.50 - Linha de corrente para o caso com $\lambda = 41$ s.	75
Figura 5.51 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o caso com $\lambda = 41$ s.	76
Figura 5.52 - Linha de corrente para o caso com $\lambda = 4100$ s.	76
Figura 5.53 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o caso com $\lambda = 4100$ s.	77
Figura 5.54 - Linha de corrente para o caso com $n = 0,25$.	78
Figura 5.55 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o caso com $n = 0,25$.	78
Figura 5.56 - Linha de corrente para o caso com $n = 0,75$.	79
Figura 5.57 - Campo de viscosidades (Pa.s) para o caso com $n = 0,75$.	79
Figura 5.58 - Linha de corrente para o caso com $\eta_o = 6,44 \times 10^7$ Pa.s.	80
Figura 5.59 - Campo de viscosidades (Pa.s) com $\eta_o = 6,44 \times 10^7$ Pa.s.	81
Figura 5.60 - Perfil de velocidades no centro do tubo central, $L_0 + 0,5 L$, com λ variando.	81
Figura 5.61 - Perfil de velocidades no centro do tubo central, $L_0 + 0,5 L$, com n variando.	82

Nomenclatura

- a coeficiente exponencial (adimensional)
- D diâmetro do tubo central (m)
- d diâmetro dos tubos de entrada e saída (m)
- R raio do tubo central (m)
- R_0 raio dos tubos de entrada e saída (m)
- n índice de comportamento ou power law (adimensional)
- p pressão (Pa)
- k índice de consistência ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)
- L comprimento do tubo central (m)
- L_0 comprimento dos tubos de entrada e saída (m)
- \mathbf{v} vetor velocidade (m/s)
- u componente da velocidade na direção axial (m/s)
- v componente da velocidade na direção radial (m/s)
- w componente da velocidade na direção tangencial (m/s)
- \mathbf{e}_z vetor unitário na direção axial
- \mathbf{e}_r vetor unitário na direção radial
- \mathbf{e}_θ vetor unitário na direção tangencial
- g gravidade (m/s^2)
- De numero de Deborah
- Re numero de Reynolds
- fRe fator de atrito pelo numero de Reynolds
- \mathbf{T} tensor das tensões (Pa)
- \bar{u} velocidade media (m/s)

Símbolos Gregos

η função viscosidade

η_0 viscosidade a baixas taxas de deformação ou
limite superior da viscosidade (Pa .s)

η_∞ viscosidade a altas taxas de deformação (Pa .s)

λ constante de tempo

α expoente de potência

ρ densidade do fluido

τ_0 tensão limite de escoamento

$\tau_{1/2}$ modulo do tensor das deformações ($\sqrt{0,5 \text{ tr } \boldsymbol{\tau}^2}$)

μ_p viscosidade plástica

$\boldsymbol{\tau}$ tensor das tensões

$\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ tensor taxa de deformação (Pa .s)

$\dot{\gamma}$ modulo do tensor taxa de deformação ($\sqrt{0,5 \text{ tr } \dot{\boldsymbol{\gamma}}^2}$)

$\dot{\gamma}_c$ taxa de deformação característica

ϕ variável dependente

Γ termo de difusão

S termo de fonte