

Aline Amaral Quintella Abdu

**Comportamento Elongacional dos
Materiais Termoplásticos Compósitos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica**

Rio de Janeiro
Agosto de 2007



Aline Amaral Quintella Abdu

**Comportamento Elongacional dos
Materiais Termoplásticos Compósitos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento
de Engenharia Mecânica da PUC–Rio

Orientador: Prof. Monica Feijo Naccache

Rio de Janeiro
Agosto de 2007



Aline Amaral Quintella Abdu

Comportamento Elongacional dos Materiais Termoplásticos Compósitos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau 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. Monica Feijo Naccache, Ph.D.

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes, Ph.D.

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-RJ

Prof. Roney Thompson, Ph.D.

Departamento de Engenharia Mecânica – UFF

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de Agosto de 2007

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

Aline Amaral Quintella Abdu

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, tendo dedicado 3 anos à projetos de iniciação científica (PROFIX-CNPq). Atualmente trabalha na área de petróleo e gás.

Ficha Catalográfica

Abdu, Aline Amaral Quintella

Comportamento Elongacional dos Materiais Termoplásticos Compósitos / Aline Amaral Quintella Abdu; orientadora: Monica Feijo Naccache . — 2007.

75 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Escoamentos Viscoelásticos. 3. Reômetro Capilar. 4. Materiais Compósitos. I. Naccache, Monica Feijo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Aos meus pais, meu irmão e meus amigos pelo apoio e compreensão e paciência durante a elaboração deste trabalho.

A professora Mônica Feijó Naccache por sua dedicação e inestimável contribuição na minha formação e elaboração deste trabalho.

À PUC-Rio, ao CNPq, pelos auxílios concedidos para a realização deste trabalho.

Resumo

Abdu, Aline Amaral Quintella; Naccache, Monica Feijo. **Comportamento Elongacional dos Materiais Termoplásticos Compósitos**. Rio de Janeiro, 2007. 75p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os materiais termoplásticos compósitos, tais como o polipropileno reforçado com fibras de vidro curtas, são usados cada vez mais em diversos setores industriais. O reforço da fibra de vidro é uma forma utilizada para melhorar as propriedades mecânicas dos termoplásticos, devido ao elevado módulo das fibras e à melhor adesão entre as fibras e a matriz polimérica. No entanto, há poucas informações referentes às propriedades desses fluidos na literatura. No presente trabalho, um estudo das propriedades cisalhantes e elongacionais do polipropileno reforçado com fibras de vidros curtas é apresentado. As viscosidades cisalhantes e elongacionais foram obtidas em um reômetro capilar através da medição da queda de pressão na entrada convergente de um capilar axissimétrico. Utilizaram-se duas geometrias diferentes na entrada do capilar, para a obtenção dos dados experimentais: as geometrias semi-hiperbólica convergente e cônica convergente. Neste último, a viscosidade elongacional foi obtida a partir da queda de pressão na entrada, utilizando as análises de Cogswell e Binding. Simulações numéricas foram realizadas com o objetivo de investigar o comportamento do polipropileno em um processo de extrusão. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento foram resolvidas utilizando o método dos elementos finitos a partir do programa comercial Polyflow (Ansys). Para modelar o comportamento da mecânica viscoelástica do polipropileno foram utilizados os modelos de Maxwell, Oldroyd-B e Phan-Thien Tanner (PTT), no entanto a comparação entre os resultados numéricos e os experimentais obtidos no reômetro capilar não apresentaram concordância satisfatória.

Palavras-chave

escoamentos viscoelásticos, reômetro capilar, materiais compósitos.

Abstract

Abdu, Aline Amaral Quintella; Naccache, Monica Feijo. **Elongational Behavior of Composite Thermoplastic Materials**. Rio de Janeiro, 2007. 75p. MSc. Dissertation — Departament of Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Composite thermoplastic materials, like glass fiber reforced polypropylene, are used increasingly in several industries. In particular, glass fiber reinforcement is used to improve the mechanical properties of thermoplastics, due to the high fiber modulus and to the better adhesion between the fibers and the polymeric matrix. However, few data of material properties of these fluids are available in the literature. In this work, a study of shear and elongational properties of a commercial short glass fiber reinforced polypropylene is presented. The shear and elongational viscosities were obtained using the pressure drop measured at a capillary rheometer, with axisymmetric converging dies. Two different die geometries were used: semi-hyperbolically convergent dies and conical convergent dies. In the last case, the elongational viscosity was obtained using the Cogswell and Binding analysis. Numerical simulations were also performed, to investigate the flow field through the extrusion die process, and to evaluate the pressure drop and elongational viscosity. The conservation equations of mass and momentum were solved via the finite element method, using the commercial program POLYFLOW (Ansys). The Maxwell, Oldroyd B and Phan Thien-Tanner (PTT) constitutive equations were used to model the viscoelastic mechanical behavior of Polypropylene, but the comparison between numerical results and experimental data obtained from the capillary rheometer did not show good agreement.

Keywords

viscoelastic flows, capillary rheometer, composite materials

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos do trabalho	15
2	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE MODELOS REFORÇADOS COM FIBRAS E DO POLIPROPILENO	17
2.1	Reometria	17
2.2	Equacionamento da Análise de Cogswell	23
2.3	Equacionamento da Análise de Binding	27
3	ANÁLISE EXPERIMENTAL	29
3.1	Resultados Experimentais	30
4	ANÁLISE NUMÉRICA	48
4.1	Objetivos	48
4.2	Modelagem Matemática	48
4.3	Condições de Contorno	52
4.4	Programa Polyflow	53
4.5	Teste de malha	55
4.6	Resultados	57
5	MICROSCOPIA	65
6	CONCLUSÕES	72
6.1	Propostas para trabalhos futuros	73
	BIBLIOGRAFIA	74

Lista de Figuras

2.1	Esquema de um reômetro capilar.	18
2.2	Reômetro capilar ACER 2000.	19
2.3	Curva da viscosidade cisalhante em função da deformação.	20
2.4	Geometria dos capilares.	21
2.5	Esquema geometria cônica convergente.	24
2.6	Esquema geometria semi-hiperbólica.	26
3.1	Comparação dos resultados de viscosidade com e sem a adição do estabilizador Irganox 225.	30
3.2	Repetibilidade dos testes.	31
3.3	Comparação dos valores de viscosidade para diferentes taxas de compactação.	32
3.4	Viscosidade cisalhante <i>versus</i> taxa de cisalhamento para o polipropileno puro, para o reforçado com 10% e 30% de fibra de vidro.	33
3.5	Comparação entre o polipropileno puro e o reforçado com 30% de fibra de vidro com [11]. Os resultados para o polipropileno puro foram multiplicados por 0,1 por conveniência.	34
3.6	Viscosidade cisalhante em função da taxa de cisalhamento para diferentes razões de aspecto (L/D).	35
3.7	Curva da queda de pressão total em função de L/D para o polipropileno puro.	36
3.8	Curva da queda de pressão total em função de L/D para o polipropileno reforçado com 10% de fibra de vidro.	37
3.9	Curva da queda de pressão total em função de L/D para o polipropileno reforçado com 30% de fibra de vidro.	38
3.14	Função $R(z)$ descrita pela geometria do capilar hiperbólico.	38
3.10	Gráfico da viscosidade cisalhante após a correção de Bagley para o PP0.	39
3.11	Gráfico da viscosidade cisalhante após a correção de Bagley para o PP10.	40
3.15	Tempo de residência para o polipropileno puro e diferentes geometrias.	40
3.12	Gráfico da viscosidade cisalhante após a correção de Bagley para o PP30.	41
3.13	Função $R(z)$ descrita pela geometria do capilar cônico	42
3.16	Viscosidade elongacional aparente obtida com o capilar semi-hiperbólico, <i>Hencky strain</i> 4.	43
3.17	Viscosidade elongacional aparente obtida com o capilar semi-hiperbólico, <i>Hencky strain</i> 7.	44
3.18	Viscosidade elongacional aparente para todas as análises.	45
3.19	Viscosidade elongacional aparente para o polipropileno puro.	45
3.20	Viscosidade elongacional aparente para o polipropileno com 10% de fibra de vidro.	46

3.21	Viscosidade elongacional aparente para o polipropileno com 30% de fibra de vidro.	46
3.22	Comparação entre as análises de Cogswell e Binding.	47
4.1	Viscosidade elongacional prevista pelo modelo de Maxwell.	51
4.2	Viscosidade elongacional prevista pelo modelo de Oldroyd-B.	52
4.3	Viscosidade elongacional prevista pelo modelo PTT.	53
4.4	Domínio computacional da geometria cônica convergente e da geometria hiperbólica.	54
4.5	Teste de malhas.	56
4.6	Perfil de velocidade na posição $y = 0,015$ m.	57
4.7	Pressão adimensional na linha de centro.	58
4.8	$\tau_{11} - \tau_{22}$ na posição $y = 0,041$ m.	59
4.9	$\tau_{11} - \tau_{22}$ na posição $y = 0,015$ m.	60
4.10	Campo de velocidade.	61
4.11	Campo de pressão.	61
4.12	Diferença de tensões normais.	62
4.13	Campo de velocidade.	62
4.14	Campo de pressão.	63
4.15	Diferença de tensões normais.	63
4.16	Campos de velocidade, pressão e primeira diferença de tensões para a geometria semi-hiperbólica.	64
4.17	Campos de velocidade, pressão e primeira diferença de tensões para a geometria semi-hiperbólica considerando a condição de deslizamento na parede.	64
5.1	PP10 com $\dot{\gamma} = 10$.	66
5.2	PP10 com $\dot{\gamma} = 100$.	67
5.3	PP10 com $\dot{\gamma} = 300$.	67
5.4	PP10 com $\dot{\gamma} = 700$.	68
5.5	PP10 com $\dot{\gamma} = 1000$.	68
5.6	PP30 com $\dot{\gamma} = 10$.	69
5.7	PP30 com $\dot{\gamma} = 100$.	69
5.8	PP30 com $\dot{\gamma} = 300$.	70
5.9	PP30 com $\dot{\gamma} = 700$.	70
5.10	PP30 com $\dot{\gamma} = 1000$.	71
5.11	PP30 Strain 4.	71

*Um raciocínio lógico leva você de A a B. A imaginação leva
você a qualquer lugar.*

Albert Einstein.