

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

MURILO VIANNA VERCELLINO

**Modelagem, simulação e otimização de processo de extrusão de
filmes plásticos tubulares**

Lorena
2014

MURILO VIANNA VERCELLINO

**Modelagem, simulação e otimização de processo de extrusão de
filmes plásticos tubulares**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de Lorena da Universidade
de São Paulo como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro Químico.

Área do trabalho: Engenharia Química,
Modelagem e Simulação.

Orientador: Prof. Dr. Félix Monteiro Pereira

Lorena
2014

DEDICATÓRIA

À minha família pelo apoio e por tornar tudo possível.

Aqueles que estiveram, de longe ou de perto, apoiando, torcendo ou ajudando.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Félix que auxiliou no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos que caminharam comigo durante todo o caminho.

RESUMO

VERCELLINO. M. V. **Modelagem, simulação e otimização do processo de extrusão de filmes plásticos tubulares**, 2014. 42p. Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

A extrusão de filme tubular é um dos principais processos da indústria de transformação plástica correspondendo a aproximadamente 85% do total de filme plástico produzido. O processo é influenciado por diversas variáveis manipuláveis que, quando reguladas de forma incorreta podem acarretar na obtenção de um produto fora das especificações, com baixa qualidade e com baixa produtividade, elevando o custo final do processo. Considerando essa dependência do processo com relação à regulação das variáveis manipuláveis, o presente trabalho oferece uma proposta para a regulação dessas variáveis utilizando ferramentas de modelagem, simulação e otimização de processos, onde buscou-se uma metodologia que fosse capaz de fornecer valores otimizados para as variáveis manipuláveis (vão da matriz, temperatura da matriz, pressão interna do balão, força do puxador e vazão) com a finalidade de obter filmes plásticos tubulares dentro das especificações pré-estabelecidas (largura do filme, espessura e estiramento total do filme na direção da máquina e na direção transversal). Os resultados obtidos mostram que a metodologia abordada no presente trabalho de conclusão de curso foi capaz de fornecer valores otimizados para a regulação das variáveis manipuláveis para a obtenção de um produto com características pré-definidas. Após a otimização realizou-se uma análise da sensibilidade paramétrica que forneceu informações relevantes para a proposta de uma sequência de operações da extrusora. Dessa forma, o presente trabalho pode vir a colaborar com a redução de custos no processo de extrusão de filmes tubulares.

Palavras-chave: Modelagem e Simulação, Otimização, Extrusão, Filme Tubular, Plásticos, Polímeros.

ABSTRACT

VERCELLINO. M. V. **Modelling, simulation and optimization of blown film extrusion process**, 2014. 42sp. Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

Blown film extrusion is one of the main processes of plastic transformation industry and correspond approximately to 85% of the whole plastic film produced. The process is influenced by many manipulable variables that when are not well adjusted may lead to products out of specification, poor quality and low productivity increasing the final process cost. Considering this dependence of the process related to the adjustment of the manipulable variables, this work proposes a way for setting these variables by means of process modelling, simulation and optimization, where we sought for a methodology that could provide optimized values for the controllable variables (die gap, die temperature, internal pressure of the bubble, pulling force of the film and volumetric flow rate) with the aim of producing a blown film with the desired specification (film width, thickness and total film stretch in machine and transversal directions). The results obtained show that the methodology in this work was capable of providing optimized values for the adjustment of the manipulable variables to obtain a product with predefined characteristics. After the optimization it was performed a parametric sensitivity analysis that provided relevant information to propose a sequence of operation of the extruder. This way the present work might come in handy for collaborating with the cost reduction of the blown film extrusion process.

Keywords: Modelling and Simulation, Optimization, Extrusion, Blown film, Plastics, Polymers.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Uma extrusora de filme tubular completa (KOLARIK, R. 2012).....14
- Figura 2** - Exemplo de extrusura de filme tubular soprado (CARNEVALLI, 2014)
.....15
- Figura 3** - Uma extrusora normalmente usada no bombeamento e fusão de polímeros com seus componentes principais:(1) Funil de Alimentação; (2) Motor de acionamento da rosca; (3) Barril; (4) Aquecedores do barril; (5) Sistema de refrigeração; (6) Matriz da extrusora; 7) Bomba de Água. (VIGNOL, 2006).....15
- Figura 4** - Extrusora produzindo filme com polietileno de baixa densidade (KOLARIK, R; ZATLOUKAL. M., 2013)27
- Figura 5** - Extrusora produzindo filme com polietileno de alta densidade (ZATLOUKAL, M.; VLČEK J. 2006)27
- Figura 6** - Gráfico de análise de sensibilidade paramétrica.....34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura e símbolos do modelo de Majumder.....	24
Tabela 2 - Especificações de Filmes.....	32
Tabela 3 - Especificações Otimizadas.....	33
Tabela 4 - Condições que Otimizam os Produtos.....	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Justificativas	11
1.2. Objetivos Gerais	Erro! Indicador não definido.
1.3. Objetivos Específicos	Erro! Indicador não definido.
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. A extrusão de filme tubular	13
2.2. Extrusora	14
2.2.1. A rosca	16
2.2.2. O barril.....	17
2.2.3. Cabeçote	17
2.2.4. Matriz Anelar	17
2.2.5. O balão.....	18
2.2.6. Ar.....	18
2.2.7. Sistema IBC	19
2.2.8. Anel de Ar.....	19
2.2.9. Gaiola de Calibração	19
2.2.10. Estrutura de Recolhimento	19
2.2.11. Rolo Puxador ou Rolo Pinsador	20
2.2.12. Bobinadeira	20
2.3. Correlação entre as propriedades físicas e o estiramento do filme	20
2.4. Matérias-primas usadas no processo de extrusão	20
2.5. Variáveis Influentes no Processo	22
2.6. Modelo Matemático para a Simulação do Processo de Extrusão.....	23
2.7. Função Desejabilidade	27
3. METODOLOGIA	30
3.1. Otimização por meio da Função Desejabilidade	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5. CONCLUSÃO	35
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1. Introdução

Diante de um mercado global cada vez mais competitivo, a redução dos custos de produção consiste em uma etapa importante para manter uma empresa competitiva e ativa no mercado. Nesse contexto, a indústria de plásticos possui interesse na utilização de várias técnicas para a redução de custos a fim de aumentar sua competitividade no mercado atual. Baseado nesse preceito, o presente trabalho de conclusão de curso apresenta uma proposta para a melhoria da produção do filme plástico, utilizando como ferramentas a simulação computacional e a otimização do processo de extrusão.

O filme plástico é um produto da indústria de transformação plástica que tem como destino diferentes aplicações, desde a simples sacola plástica até finalidades mais nobres, como embalagens para alimentos e aplicações médicas. A grande maioria dos filmes plásticos é produzida pelo processo de extrusão, mais especificamente, a extrusão de filme tubular soprado, que corresponde a aproximadamente 85% do total de filme produzido. (ABDEL-BARY, 2003)

A extrusão de filme tubular é um processo de transformação de plásticos que envolve diversas variáveis que trazem como consequência variações de qualidade do produto extrudado. No processo propriamente dito, o polímero é fundido e bombeado na extrusora em direção de uma matriz anelar que dará ao plástico a forma de um tubo que será soprado originando um balão que é resfriado e enrolado em bobinas.

Este trabalho de conclusão de curso originou-se da observação do processo de extrusão de filmes tubulares de uma empresa privada da cidade de Guaratinguetá, onde se observou que a produtividade, a qualidade e o custo do processo estão sendo prejudicados pelos ajustes de máquina, os quais, quando realizados de forma errada, produzem um filme de baixa qualidade, acarretando em retrabalhos e perdas de produto, aumentando assim o custo do final processo.

1.1. Justificativas

A partir da observação do processo de extrusão de filme tubular de uma determinada empresa, notou-se a grande quantidade de recursos sendo desperdiçados devido à incorreta regulagem das máquinas. Para tais regulagens, os operadores utilizam-se de valores empíricos para as variáveis controláveis do processo, ou seja, os valores são testados até o momento em que o processo se estabiliza, mantendo os parâmetros nos níveis regulados até que algum problema seja constatado, demonstrando nova necessidade de ajuste. Ajustes podem ser necessários em casos como a troca de matéria-prima, instabilidades ou furo do balão. O empirismo utilizado na definição dos parâmetros adequados gera perdas de produtos e de tempo útil de produção, além de despesa na recuperação (reciclagem) dos materiais, acarretando em um elevado custo do produto final.

Diante deste quadro justifica-se um estudo do processo para o melhor entendimento de seu comportamento, para que se possa intervir no processo em busca de sua melhoria.

A extrusão é um processo complexo que possui várias variáveis de entrada, o que faz com que o método empírico não seja o ideal para sua regulagem, haja vista a grande dificuldade de se concluir, sem cálculos, se os parâmetros estão em seu valor ótimo para o processo. Sendo assim, faz-se necessária a utilização de um modelo matemático para a simulação planejada dos diferentes fatores influentes, o que permite otimizar o processo em função das características desejadas para o produto final.

Para atingir os resultados almejados no presente trabalho, foram propostos os objetivos apresentados a seguir.

1.2. Objetivos Gerais

O objetivo principal do presente trabalho de conclusão de curso é apresentar uma metodologia capaz de obter valores otimizados para as variáveis manipuláveis (vão da matriz, temperatura da matriz, pressão interna do balão, força no puxador e vazão) de um processo de extrusão de filmes tubulares, a fim de obter um produto com características pré-determinadas (largura do filme, espessura e estiramento total do filme na direção da máquina e na direção transversal).

1.3. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o processo de extrusão de filmes tubulares, analisando as variáveis influentes no processo;
- Simular o processo de extrusão de filmes plásticos tubulares utilizando modelo matemático disponível na literatura;
- Estimar os valores ótimos para as variáveis principais que afetam o processo de extrusão de filmes plásticos para a obtenção de um produto com características específicas.

2. Revisão Bibliográfica

Para um melhor entendimento do processo de extrusão de filmes plásticos tubulares e dos modelos matemáticos envolvidos nesse processo foi realizada a revisão bibliográfica apresentada nos itens a seguir.

2.1. A extrusão de filme tubular

Extrusão é o um processo de transformação plástica com função de fundir e bombear o polímero através de um orifício para uma posterior fase de processo, normalmente uma moldagem do material (ABDEL-BARY, 2003).

A extrusão de filme tubular é uma técnica utilizada para se produzir filmes plásticos, que podem ser destinados para diversas finalidades dependendo do material utilizado das propriedades obtidas, tais como sacolas plásticas e filmes para alimentos (ABDEL-BARY, 2003).

Uma explicação mais ampla é citada por Cantor (2006) que diz que a produção do filme se dá por meio da extrusão, sendo que para a obtenção do plástico na forma de filme, a moldagem se dará através de uma matriz anelar, onde o polímero passará em sua forma fundida, proveniente da extrusora que fornece o material homogêneo, à pressão e temperaturas constantes, através de um anel e será soprado, atribuindo ao plástico a forma de um balão. A Figura 1 mostra o processo de extrusão de filme tubular.

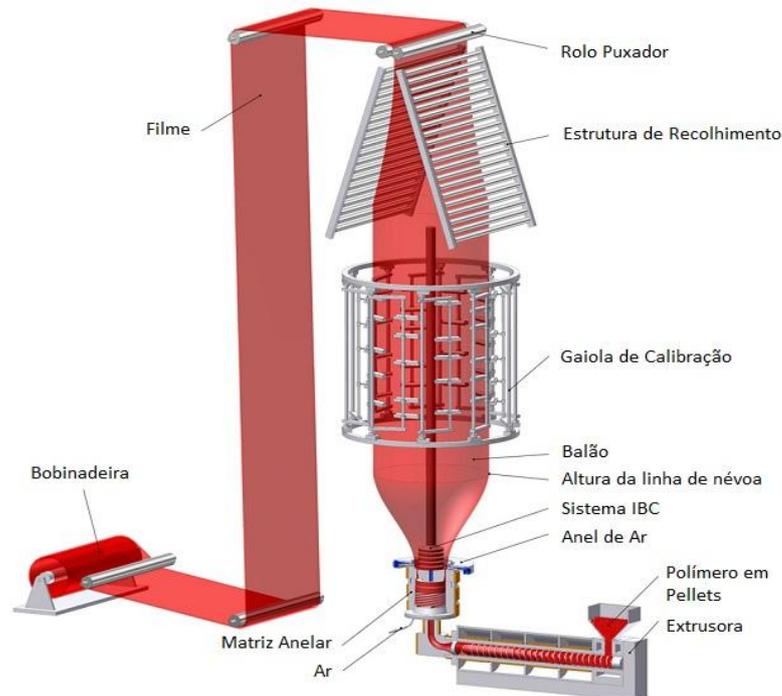


Figura 1 - Uma extrusora de filme tubular completa. (KOLARIK, 2012).

Os componentes que compõem a extrusora de filmes, ilustrados na figura 1, são apresentados nos itens a seguir.

2.2. Extrusora

As extrusoras existem nas mais diversas configurações, sendo normalmente de uma ou duas roscas, com diferentes medidas e geometrias possíveis, tais como diâmetro (influenciando na vazão mássica e na escolha do motor) e ângulo da rosca (BAIRD; COLLIAS, 1998).

A extrusora é composta do sistema de alimentação, que fornece energia mecânica ao sistema (necessário para transportar o polímero fundido e viscoso e bombeá-lo até a matriz); um sistema redutor, que diminui a alta rotação do motor do sistema de alimentação (pois a alta rotação impede o uso da rosca diretamente com o motor, o que causaria um aquecimento excessivo ao polímero, além de uma pressão muito alta no canhão); um sistema de alimentação composto pelo funil de alimentação e boca de alimentação; um barril e uma rosca, considerada a parte mais importante da extrusora (CANTOR, 2006). A Figura 2 ilustra uma extrusora de filme tubular soprado, que é o conjunto da extrusora,

matriz e outros acessórios, enquanto a Figura 3 ilustra apenas a parte conhecida como extrusora.



Figura 2 - Exemplo de extrusora de filme tubular soprado. (CARNEVALLI, 2014).

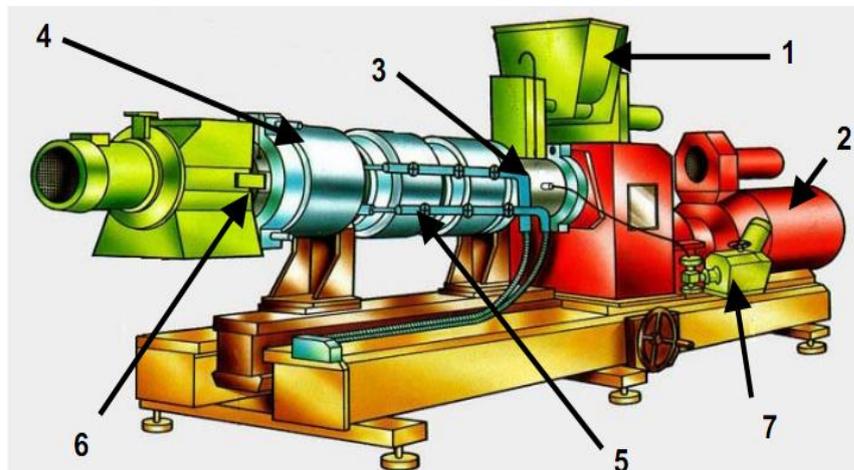


Figura 3 - Uma extrusora normalmente usada no bombeamento e fusão de polímeros com seus componentes principais: (1) Funil de Alimentação; (2) Motor de acionamento da rosca; (3) Barril; (4) Aquecedores do barril; (5) Sistema de refrigeração; (6) Matriz da extrusora; (7) Bomba de Água. (Fonte: VIGNOL, 2006).

2.2.1. A rosca

Os processos de transformação plástica acontecem em equipamentos que aquecem e cisalham o polímero e, dependendo do processo, as condições do processamento são bastante distintas. No caso da extrusão, um dos principais componentes que causam esse aquecimento e cisalhamento com o material é a rosca (MANRICH, 2006).

A rosca tem a função de fundir, homogeneizar e transportar o polímero. Devido ao fato de realizar várias tarefas, além de fornecer energia com o cisalhamento do polímero e como consequência gerar aquecimento, a rosca deve possuir em seu projeto uma geometria que forneça a máxima eficiência, vazão contínua, plastificação e homogeneização adequadas ao plástico, sem causar-lhe danos (ABDEL-BARY, 2003).

Um exemplo de como a geometria da rosca influencia no processamento é o fato de o polímero nas suas mais diversas formas, como grãos ou pó, possuírem densidades aparentes diferentes daquela no estado fundido, sendo que normalmente a densidade aparente é menor que a do estado fundido devido ao fato de existirem espaços vazios entre os grãos. Ocorre que na fusão do material, essa densidade aumenta de duas até quatro vezes o valor da densidade aparente. Devido a isso, o material necessita sofrer uma compressão compensar o efeito da diminuição do volume, para se conseguir os níveis adequados de cisalhamento (MANRICH, 2006).

As roscas variam em configurações, mas, independente da rosca que se use, são divididas em três seções: a seção de alimentação, a seção de transição e a de dosagem. A compressão da rosca é quantificada em função da taxa de compressão, que depende do tipo de polímero e da densidade aparente (MANRICH, 2006).

A taxa de compressão é igual à profundidade do canal de alimentação dividido pela profundidade do canal de dosagem. Outra relação geométrica importante é a taxa L/D (do inglês, "*length*" e "*diameter*"), comprimento da rosca dividido por seu diâmetro (BAIRD; COLLIAS, 1998).

2.2.2. O barril

O barril é um cilindro que envolve a rosca. Para minimizar o desgaste entre o barril e a rosca é importante que haja um correto alinhamento. O interior do barril é revestido de material resistente ao desgaste entre o barril e a rosca. As zonas de controle de temperatura são localizadas ao longo do barril, existindo também, acoplado ao mesmo, termopares e um transdutor de pressão (CANTOR, 2006).

2.2.3. Cabeçote

O cabeçote recebe o fluxo fundido que sai do barril. No cabeçote do canhão de extrusão, antes de entrar na matriz que irá dar forma ao balão, colocam-se telas (peneiras) com diferentes aberturas, uma após a outra, onde o tamanho de abertura normalmente é da maior para a menor no sentido do fluxo. Essas peneiras, dependendo de seu tamanho, auxiliarão no controle de alguns fatores como a contaminação do polímero, a viscosidade e a pressão no canhão. Tais telas têm função de servir de filtro de sujeira que possam interferir no filme final (MANRICH, 2006).

2.2.4. Matriz Anelar

A matriz é o equipamento por meio do qual o filme adquire formato, por isso a estrutura, a limpeza, o fluxo e o controle da temperatura em suas zonas devem estar em perfeitas condições para que se consiga obter os produtos dentro das especificações desejadas (MANRICH, 2006).

A uniformidade na qualidade do produto final depende de diversas variáveis, além das condições da matriz, tanto fisicamente quanto em perfil de temperatura, quanto dos demais equipamentos localizados após a extrusão, como

os puxadores e os resfriadores. Portanto, a estimativa de alguns parâmetros é útil para o cálculo do fluxo do polímero pela matriz, tais como: taxa e tensão de cisalhamento no fluxo, perfil de velocidade no canal da matriz, distribuição de temperatura na matriz, entre outros, que muitas vezes necessitam de simulação para sua análise (MANRICH, 2006).

Apesar de poder se obter uma matriz ideal por meio da simulação utilizando as propriedades dos polímeros processados, ainda podem ocorrer variações na espessura do produto, devido, por exemplo, uma variação de temperatura do fundido, alimentação (vazão) ou até mesmo tipo de grade de polímero usado, mesmo materiais com índice de fluidez iguais farão com que a matriz se comporte de modo diferente, portanto há necessidade de se fazer ajustes na matriz, como por exemplo, regular o seu lábio (*die gap*), por onde o material flui para ganhar sua forma de balão (MANRICH, 2006).

Para se regular a espessura e largura do filme, utilizam-se de acessórios localizados após a matriz, como o puxador, que ao puxar o filme saído da matriz causa no mesmo um estiramento no sentido do fluxo e encolhimento no sentido da largura e da espessura. Essa ação sobre o filme lhe confere resistência mecânica (ABDEL-BARY, 2003).

2.2.5. O balão

A geometria do balão é um fator importante nas condições do processo, pois as dimensões do balão são uma forma direta de se ter controle sobre a orientação molecular e estrutura cristalina do filme, influenciando diretamente em suas propriedades mecânicas e ópticas (CANTOR, 2006).

2.2.6. Ar

Ar atmosférico é adicionado ao polímero ao sair da matriz para que o mesmo infle, dando-lhe o formato de um balão. O ar possui também a função de

promover o estiramento do filme na direção transversal e a pressão interna deve ser mantida constante ao longo da produção (CANTOR, 2006).

2.2.7. Sistema IBC

Para aumentar a produtividade e qualidade do filme pode-se utilizar, não obrigatoriamente, um sistema chamado de IBC (Internal Bubble Cooling), o qual tem a função de aumentar a eficiência da refrigeração do balão, fornecendo constantemente ar resfriado ao interior do balão enquanto remove o ar quente. Ao tornar o filme mais resfriado permite-se aumentar a velocidade de produção (CANTOR, 2006).

2.2.8. Anel de Ar

O anel de ar, junto ao sistema IBC, tem como função fornecer ar para a área externa do balão, permitindo a troca de calor, e conseqüentemente resfriamento externo ao balão (CANTOR, 2006).

2.2.9. Gaiola de Calibração

A gaiola de calibração tem como função estabilizar o balão para diminuir as variações causadas por movimento lateral do mesmo (CANTOR, 2006).

2.2.10. Estrutura de Recolhimento

A estrutura de recolhimento tem como função promover a mudança do balão de formato tubular para um filme plano (CANTOR, 2006).

2.2.11. Rolo Puxador ou Rolo Pinsador

O Rolo Puxador possui como função impedir que o ar interno do balão escape, além de criar a força que puxa o filme da matriz (CANTOR, 2006).

2.2.12. Bobinadeira

A bobinadeira é utilizada para enrolar o filme na forma de bobinas, produz no filme uma tensão constante (CANTO, 2006).

2.3. Correlação entre as propriedades físicas e o estiramento do filme

BABEL e CAMPBELL (1993) relatam a existência de uma correlação entre o estiramento sofrido pelo filme e suas propriedades físicas, concluindo que o aumento do estiramento total sofrido pelo filme melhora suas propriedades, tal como o aumento do módulo de tração e da tensão de ruptura. O estiramento total é a soma dos estiramentos sofridos pelo filme ao longo do processo, ou seja, é a integral do estiramento da saída do filme da matriz até a linha de névoa.

2.4. Matérias-primas usadas no processo de extrusão

O material, para poder ser processado em uma extrusora, deve possuir estabilidade térmica, elevada resistência do fundido, pressão razoável e sem fratura do fundido (CANTOR, 2006).

Polímeros, como os polietilenos, que são processados em grande quantidade (commodities) e são aplicados na produção de filme, estão disponíveis no mercado em uma grande variedade de *grades*. Mudando-se o *grade*, ou tipo de polietileno usado, espera-se variações nas propriedades do

filme, acarretando em variações das condições de processamentos na extrusão (CANTOR, 2006).

O Polietileno de baixa densidade (PEBD) é relativamente fácil de processar comparado com outros Polietilenos, esse polímero possui ramificações que impedem uma alta taxa de cristalização, é fundido em temperaturas de 105°C a 115°C e não requer muita potência do motor (CANTOR, 2006).

O Polietileno de alta densidade (PEAD) é um polímero linear e o alto grau de linearidade de suas moléculas resulta em alta porcentagem de cristalinidade. Devido a essa maior cristalinidade e estrutura molecular mais consistente, sua fusão se ocorre entre 130°C a 135°C, necessitando então de maior potência do motor. Sua densidade varia de 0,93 até 0,96 g/cm³ (CANTOR, 2006).

A diferença do balão entre o PEAD e PEBD é a linha de névoa, sendo que no PEAD essa linha deve ser mais alta e no PEBD mais baixa. Além disso, a estabilidade do balão também é diferente, o PEAD, por ter menor resistência do fundido, o balão é mais instável, tenta-se diminuir esse problema atrasando o alongamento transversal até o momento em que o polímero estiver em menor temperatura (CANTOR, 2006).

Outro polímero também utilizado é o polietileno linear de baixa densidade (PELBD), esse produto possui densidades que variam de 0,88 até 0,93 g/cm³. Sua temperatura de fusão requer alta potência do motor, entretanto sua resistência de fundição é menor que a do PEBD e maior que do PEAD, sua resistência é mais alta que a do PEBD tendendo à do PEAD (CANTOR, 2006).

As temperaturas de processamento dos polímeros muitas vezes não podem atingir a temperatura de fusão cristalina (T_m), pois nessa temperatura a viscosidade do material diminui, aumentando a força de cisalhamento podendo, nessa temperatura, ocorrer a degradação do material. Portanto uma relação ideal entre temperatura e facilidade de processamento do material, como por exemplo, uma fluidez ideal para fluir por canais com pressão adequada ao equipamento, deve ser encontrada (MANRICH, 2005).

Diferentes tipos de polietilenos (PEAD, PEBD, PELBD) além de poderem ser processado em sua forma pura, podem ser misturados entre si, para que o material processado possua propriedades diferentes da que teria caso fosse processado sozinho, como por exemplo, um aumento de resistência mecânica

pode ser alcançado misturando-se diferentes grades de Polietileno (YAMANE, 2011).

2.5. Variáveis Influentes no Processo

O controle das variáveis do processo é de fundamental importância, pois sem tais controles, não é possível nem mesmo se estimar a localização de um determinado problema durante o processamento, no caso de sua ocorrência. A alta interdependência entre as variáveis do processo acarreta na necessidade de medição e controle das principais variáveis que influenciam na geometria do balão (CANTOR, 2006).

As propriedades obtidas em um filme não são apenas resultados das características presentes no polímero utilizado, mas estão relacionadas com os esforços mecânicos que o filme sofre ao passar pela matriz da extrusora, assim como a taxa de resfriamento afeta a nucleação do polímero, influenciando na orientação molecular do filme formado (KANAI et al., 1999).

Como se pode observar, as condições de fabricação impactam na qualidade do filme produzido, devendo, portanto ser levadas em consideração durante um estudo de otimização do processo de extrusão de filme tubular.

Levando-se em consideração que uma extrusora de filmes tubulares não é composta somente da parte chamada extrusora, outras variáveis pertencentes à outras partes da extrusora também devem ser consideradas de grande importância quando se busca controlar as propriedades do produto final, tais como a temperatura da matriz, pressão interna no balão, força exercida pelo puxador e largura do vão da matriz, sendo essas as consideradas no presente trabalho.

2.6. Modelo Matemático para a Simulação do Processo de Extrusão

Para a simulação do processo de extrusão de filmes tubulares, utilizou-se do modelo matemático desenvolvido por Majumder (2008), em sua tese intitulada “*Blown Film Extrusion: Experimental, Modelling and Numerical Study*”, nesse trabalho Majumder (2008) procurou estabelecer um modelo que incorporasse dados reológicos do polímero, além das tensões e deformações sofridas pelo material ao longo do processo, a fim de fazer predições das propriedades dos filmes.

Um modelo matemático do processo de extrusão de filmes tubulares (Equações de 1 a 18) foi proposto por Majumder (2008) e será utilizado como base para a otimização das variáveis manipuláveis do processo.

$$L = \frac{(A + Br^2)\sqrt{1+r'^2}}{rh} \quad (1)$$

$$r'' = \frac{hC\sqrt{1+r'^2} - 2rB(1+r'^2)}{A + Br^2} \quad (2)$$

Onde as constantes das Equações 1 e 2 estão definidas nas equações de 3 a 6.

$$A = \frac{F_z r_0}{\eta_0 Q} - B \left(\frac{r_f}{r_0} \right)^2 \quad (3)$$

$$B = \frac{\pi r_0^3 \Delta P}{\eta_0 Q} \quad (4)$$

$$L = \frac{r_0 \sigma_{11}}{\eta_0 v_0} \quad (5)$$

$$C = \frac{r_0 \sigma_{33}}{\eta_0 v_0} \quad (6)$$

$$L' = \frac{L[1 - Y(\tau)]}{De} - \left[\frac{2(1 - \xi)Lv}{\sqrt{1+r'^2}} \left(\frac{h'}{h} + \frac{r'}{r} \right) \right] - \left[\frac{2(1 - \xi)Pv}{\sqrt{1+r'^2}} \left(\frac{2h'}{h} + \frac{r'}{r} \right) \right] - \frac{2 \ln \left(\frac{r}{rh^2} \right)}{De^2} \quad (7)$$

$$C' = \frac{C}{De} [1 - Y(\tau)] - 2(1 - \xi) \left[\frac{r' C v}{r \sqrt{1 + r'^2}} \right] - 2(1 - \xi) \left[\frac{P v}{\sqrt{1 + r'^2}} \left(\frac{h'}{h} + \frac{r'}{r} \right) \right] - \frac{2 \ln \left(\frac{r}{h} \right)}{De^2} \quad (8)$$

$$\tau_{22}' = \frac{P [1 - Y(\tau)]}{De} - \frac{2 \ln(h)}{De^2} + \frac{2(1 - \xi) P v h'}{h \sqrt{1 + r'^2}} \quad (9)$$

$$\frac{h'}{h} \left[1 - 2(1 - \xi) \frac{v}{\sqrt{1 + r'^2}} \left(1 + \frac{2P}{\sigma_{11}} \right) \right] = \frac{r'}{r} \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{11}} - 1 \right) - \quad (10)$$

$$\frac{1}{De} [1 - Y(\tau)] + \frac{2(1 - \xi) r' v}{r \sqrt{1 + r'^2}} \left(1 + \frac{P}{\sigma_{11}} \right) + \frac{2}{De^2} \ln \left(\frac{r}{rh^2} \right)$$

$$Y(\tau) = \exp \left(\frac{\varepsilon De}{\eta} (\tau_{11} + \tau_{22} + \tau_{33}) \right) \quad (11)$$

$$\eta_0(T) = \eta_0(T_0) \exp \left[Ea \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (12)$$

A equação de energia adimensional do modelo é representada pela Equação 13.

$$t' = C_e \left[C \frac{r'}{r} - L \left(\frac{h'}{h} + \frac{r'}{r} \right) \right] - C_h r t \sqrt{1 + r'^2} \quad (13)$$

$$C_h = \frac{2\pi r_0^2 H_c}{\rho C_p Q} \quad (14)$$

$$C_e = \frac{\eta_0 Q}{2\pi r_0^2 h_0 \rho C_p T_a} \quad (15)$$

$$H_c = \frac{0.084 V_{air} [560 - 780 \exp(-1.27(T_{superfície} - T_{air}) - 0.035r)]}{1 + \exp(z)} \quad (16)$$

A taxa de deformação nas direções da máquina e na direção transversal estão representadas nas Equações 17 e 18, respectivamente.

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \frac{v}{\sqrt{1 + r'^2}} \left(-\frac{H'}{H} - \frac{r'}{r} \right) \quad (17)$$

$$\dot{\varepsilon}_{33} = \frac{vr}{r \sqrt{1 + r'^2}} \quad (18)$$

As nomenclaturas e simbolos estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Nomenclatura e símbolos do modelo de Majumder (2008)

Símbolo	Nomenclatura
A	Força de Tensão Adimensional
B	Pressão do Balão Adimensional
C	Tensão adimensional na direção transversal
C_e	Coefficiente de energia de dissipação adimensional
C_h	Coefficiente de transferência de calor adimensional
C_p	Calor específico do polímero
De	Número de Deborah
E_a	Energia de ativação de fluxo
F_z	Força de tração na linha de névoa
FLH	Altura da linha de névoa
h	Espessura do filme adimensional
H	Espessura local do filme
H_c	Coefficiente de transferência de calor
L	Tensão adimensional na direção da máquina
LFW	Largura do filme
\dot{m}	Taxa de fluxo de massa
p	Pressão isotrópica
ΔP	Variação de pressão
r	Raio adimensional do balão
R	Raio local do balão
Q	Taxa de fluxo volumétrico
t	Temperatura adimensional
T	Temperatura
T_a	Temperatura do ar ambiente
T_c	Temperatura de cristalização do polímero
V	Velocidade linear
v	Velocidade adimensional
v_m	Velocidade na direção da máquina
v_t	Velocidade na direção transversal
v_n	Velocidade na direção normal
z	Distância adimensional na direção axial
Z_{FL}	Distância entre a saída da matriz e a linha de névoa
ε	Propriedade extensional no modelo Phan-Thien-Thanner
ρ	Densidade

continua

Tabela 1 – Nomenclatura e símbolos do modelo de Majumder (2008) continuação

Símbolo	Nomenclatura
λ	Tempo de relaxamento
ζ	Propriedade de escorregamento da cadeia
σ_{11}	Tensão principal na direção da máquina (direção 11)
σ_{33}	Tensão principal na direção da transversal (direção 33)
τ	Tensão desviadora (Deviatoric Stress)
η_0	Viscosidade “Zero-Shear” (ZSV)
22	Subscrito significando “na direção da espessura ou direção normal”
r'	$\left(\frac{dr}{dz}\right)$
r''	$\left(\frac{d^2r}{dz^2}\right)$
C'	$\left(\frac{dC}{dz}\right)$
L'	$\left(\frac{dL}{dz}\right)$

Segundo Majumder (2008) o modelo se ajustou melhor para representar processos de extrusão que trabalham com polietileno de baixa densidade (polímeros com cadeias ramificadas), para o qual não há formação de “pescoço” no balão (Figura 4). No caso dos polietilenos de alta densidade (PEAD), o modelo de Majumder (2008) não é capaz de representar a produção de seus filmes, pois há neste caso a formação do “pescoço”, também conhecido como balão formato “taça de vinho”, representado na Figura 5, nesse caso seria necessário o uso de outro modelo, tal como o proposto por ZATLOUKAL; VLČEK (2006), o qual não foi utilizado neste trabalho.



Figura 4 - Extrusora produzindo filme com polietileno de baixa densidade (KOLARIK; ZATLOUKAL, 2013)



Figura 5 - Extrusora produzindo filme com polietileno de alta densidade (ZATLOUKAL; VLČEK 2006)

2.7. Função Desejabilidade

O método de otimização utilizando a função desejabilidade, permite atingir resultados ótimos para múltiplas respostas simultaneamente. Essa metodologia de otimização simultânea foi proposta por G. C. Derringer e R. Suich, e se baseia na definição de uma função de desejabilidade para cada uma das múltiplas repostas,

com valores no intervalo de “0” a “1”, sendo “0” um valor inaceitável e “1” o valor mais aceitável (BARROS NETO et al., 2010).

Uma função chamada de desejabilidade global é utilizada para combinar todas as funções desejabilidade conjuntamente, a qual é definida conforme a Equação 1, a qual representa uma média geométrica das funções desejabilidade (BARROS NETO et al., 2010).

$$D = \sqrt[k]{(d_1 \times d_2 \times \dots \times d_k)} \quad (17)$$

Os valores de d são a busca por uma maximização, minimização ou um valor nominal, neste caso ao se atingir o desejado, d assume o valor $d = 1$, e quanto mais se distancia do objetivo, mais tende a zero (BARROS NETO et al., 2010).

A desejabilidade global possibilita que a otimização simultânea das respostas se reduza à maximização de um valor, a da desejabilidade global, representada por D , ou seja, busca-se que a média geométrica atinja o valor $D = 1$ (BARROS NETO et al., 2010).

Os diferentes tipos de otimização estão especificados a seguir, cada qual possui seu algoritmo próprio para a otimização da resposta desejada.

- Função de Minimização: A função atinge o maior valor ao se atingir o valor mínimo desejado, este tipo de função é também conhecido como “Menor é Melhor” (STB - *Smaller the better*), apresentada na Equação 18 (BARROS NETO et al., 2010).

$$d = \begin{cases} 0 & , & y \geq U \\ \left(\frac{y - U}{y_{\min} - U} \right)^t & , & y_{\min} < y < U \\ 1 & , & y \leq y_{\min} \end{cases} \quad (18)$$

- Função de Maximização: A função atinge o maior valor ao se atingir o valor máximo desejado, este tipo de função é também conhecido como Maior é Melhor

(*LTB - Larger the better*), apresentada na Equação 19 (BARROS NETO et al., 2010).

$$d = \begin{cases} 0 & , & y \leq L \\ \left(\frac{y-L}{y_{\min}-L} \right)^t & , & L < y < y_{\min} \\ 1 & , & y \geq y_{\min} \end{cases} \quad (19)$$

- Função de Normalização: A função atinge o valor máximo ao alcançar o valor alvo, este tipo de função é também conhecido como Nominal é Melhor (NTB *Normal the better*), apresentada na Equação 20 (BARROS NETO et al., 2010).

$$d = \begin{cases} \left(\frac{y-L}{T-L} \right)^s & , & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{y-U}{T-U} \right)^t & , & T \leq y \leq U \\ 0 & , & y \leq L \text{ ou } y \geq U \end{cases} \quad (20)$$

As variáveis “T”, “U” e “L” são os valores nominais, limites superiores de especificação e limite inferior de especificação, respectivamente. Os valores de “s” e “t” são os pesos que quando igual a um tornam a função desejabilidade linear, nos casos onde “s” > 1, maior ênfase (peso maior) terão os valor quanto mais próximos ao valor alvo, caso “s” < 1 menores serão os pesos próximos ao valor alvo (BARROS NETO et al., 2010).

3. Metodologia

Para a obtenção dos resultados deste trabalho realizou-se, primeiramente, uma revisão da literatura que serviu como base para a realização de todo o trabalho, especialmente para a obtenção de um modelo matemático fundamentado em resultados experimentais. Dessa forma, selecionou-se o modelo matemático proposto por Majunder (2008) para um determinado polímero, um polietileno de baixa densidade (PEBD), cujas características estão apresentadas no “ANEXO A”.

Partindo do modelo matemático e das características do polímero, utilizou-se de várias ferramentas numéricas para a simulação do modelo proposto. As ferramentas numéricas utilizadas foram as seguintes funções disponíveis no software Scilab, mantido e desenvolvido pela Scilab Enterprise:

a) `fminsearch`: utilizada para se achar o mínimo sem de uma função custo utilizando o algoritmo de Nelder-Mead.

b) `splin`: função de interpolação por spline cúbico, a qual emprega polinômios cúbicos para interpolar.

c) `interp`: função de avaliação de spline cúbico, para achar valores de um ponto específico da interpolação.

d) `ode`: função utilizada para a solução de sistemas de equações diferenciais ordinárias.

e) `fsolve`: função utilizada para se achar o “zero” de um sistema de funções não-lineares. No caso deste trabalho `fsolve` foi utilizado para

f) `intsplin`: função de integração de dados experimentais por spline.

Após a construção da rotina de simulação foi proposta uma programação utilizando a linguagem do Scilab para a otimização do processo contendo as seguintes funções ou subrotinas:

a) `otimiza`: função utilizada para realizar a busca pela otimização.

b) `simula`: função que realiza a simulação do processo, tendo como entrada os valores de vão da matriz (V_m), temperatura da matriz (T_m), pressão interna (P_{ri}), força do puxador (F_{rp}) e vazão (V_z).

c) df: função contendo o sistema de equações diferenciais.

d) fnew: função utilizada para se buscar a altura (valor de “z”) até onde a solução do modelo deve ser computada, pois acima desta altura, onde a derivada do raio passa a ser zero, não há mais mudanças no formato do filme.

e) fobj: função onde se calcula os valores da função desejabilidade (descrita no item 2.7.)

O código completo desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso encontra-se no “ANEXO B”.

4. Resultados e discussões

Para verificar a metodologia apresentada, foram propostas as especificações para os filmes apresentados na Tabela 2 .

Tabela 2 – Especificações de Filmes

Simulação	LF	E
	Largura do Filme (m)	Espessura (mm)
1	0,90	0,075
2	0,90	0,100
3	0,90	0,125
4	1,00	0,075
5	1,00	0,100
6	1,00	0,125
7	1,10	0,075
8	1,10	0,100
9	1,10	0,125
10	1,20	0,075
11	1,20	0,100
12	1,20	0,125

Após a simulação e otimização do processo, obteve-se como resultado as especificações do produto em seu valor otimizado (Tabela 3), assim como os as variáveis manipuláveis do processo que produzem tais produtos, apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3 – Especificações Otimizadas

Simulação	LF	E	EstTotal11	EstTotal33
	Largura do Filme (m)	Espessura (mm)	Estiramento total (Direção 11)	Estiramento total (Direção 33)
1	0,90	0,075	3,483	1,433
2	0,90	0,100	3,000	1,409
3	0,90	0,125	3,385	1,460
4	1,00	0,075	3,150	1,407
5	1,00	0,100	3,426	1,401
6	1,00	0,125	3,466	1,400
7	1,10	0,075	3,113	1,400
8	1,10	0,100	3,142	1,442
9	1,10	0,125	3,219	1,495
10	1,20	0,075	3,182	1,400
11	1,20	0,100	3,187	1,427
12	1,20	0,125	3,360	1,479

Tabela 4 – Condições que Otimizam os Produtos

Simulação	Vm	Tm	Pri	Frp	Vz
	Vão da Matriz (mm)	Temperatura da Matriz (°C)	Pressão Interna (Pa)	Força do Puxador (N)	Kg/h
1	1,16	193,41	68,935	19,645	84,962
2	1,39	190,07	56,310	15,897	161,759
3	1,96	197,02	61,708	18,955	74,141
4	1,22	191,73	91,238	30,551	123,621
5	1,72	192,18	123,612	42,301	82,485
6	2,18	190,31	125,918	43,817	73,818
7	1,35	194,36	116,435	46,292	133,627
8	1,83	193,74	109,238	44,098	139,322
9	2,37	191,40	101,772	41,832	135,512
10	1,51	192,67	159,608	74,471	132,578
11	2,04	193,04	151,677	71,671	136,464
12	2,68	190,01	135,482	65,162	117,419

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que a otimização do processo atingiu o objetivo de obter as condições pré-estabelecidas, no caso dos resultados da Tabela 3, a desejabilidade obtida foi máxima (igual a 1) para todos os casos.

Os parâmetros obtidos na Tabela 4 podem ser úteis para a etapa de operação do processo, pois fornecem um ponto de partida para ajuste do equipamento.

Com a finalidade de verificar a sensibilidade do ajuste ótimo a variações das variáveis ajustáveis, realizou-se uma análise da sensibilidade paramétrica, variando cada parâmetro em +30% e -30%, verificando a diferença percentual obtida no ajuste do modelo. Essa análise é apresentada na figura 6, onde os símbolos “+” e “-” são adicionados aos parâmetros para indicar uma variação de +30% e -30% nos parâmetros.

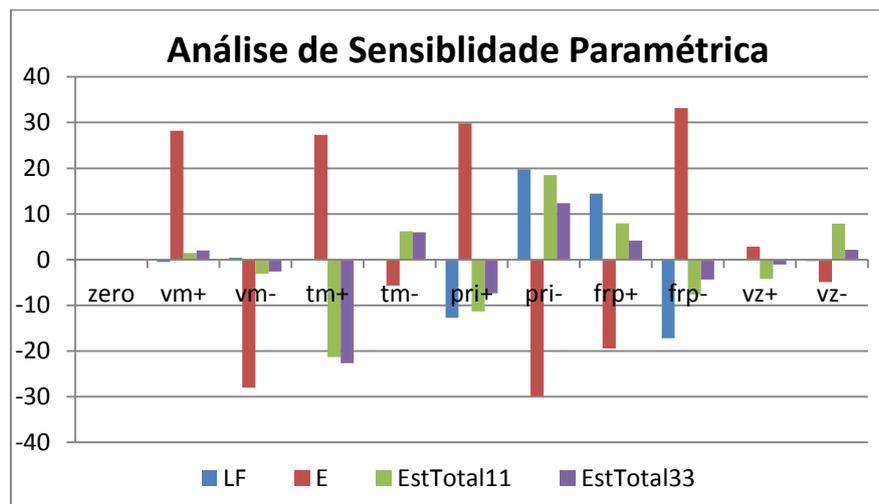


Figura 6 - Gráfico de análise de sensibilidade paramétrica.

A Figura 6 mostra que:

- O comprimento do filme (LF) é sensível principalmente a variações nos parâmetros pressão interna (Pri) e força no puxador (Frp), sendo pouco sensível a variação dos demais parâmetros.

- A espessura do filme é bastante sensível à variação da grande maioria dos parâmetros, sendo pouco sensível apenas à variação da vazão (Vz).

- Os valores de estiramento total (EstTotal11 e EstTotal33) são sensíveis à variação da maioria dos parâmetros, sendo menos sensível à variação do vão da matriz.

Dessa forma, caso se deseje corrigir o comportamento do processo durante a operação, aconselha-se corrigir primeiramente a largura do filme (LF) alterando a força no puxador, depois os estiramentos totais pela temperatura da matriz (Tm) e por último a espessura, alterando o vão da matriz (Vm).

É importante ressaltar que a metodologia proposta no presente trabalho depende de comprovação experimental para ser validada.

5. Conclusão

A partir dos resultados obtidos neste presente trabalho de conclusão de curso pode-se concluir que:

- A proposta de otimização apresentada foi capaz de obter valores otimizados para as variáveis ajustáveis em um processo de extrusão de filmes plásticos tubulares em função de valores pré-estabelecidos de comprimento, espessura e estiramento total.

- A partir dos valores otimizados e de uma análise de sensibilidade paramétrica foi possível propor uma rotina operacional para a correção das características do produto final.

- Os métodos utilizados podem vir a colaborar com a redução de gastos no processo, caso a metodologia proposta no presente trabalho seja validada experimentalmente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-BARY, E. M. **Handbook of Plastic Films**. Shrewsbury: Rapra Technology Limited, 2003.

BABEL, A. K.; CAMPBELL, G. A. Correlating the Plastic Strain with the Properties of the Low Density Polyethylene Blown Film. **Journal of Plastic Film and Sheeting**, Rochester, NY, USA, v. 9, p. 249-258, 1993.

BAIRD, D. G.; COLLIAS, D. I. **Polymer processing: principles and desing**. New York: Wiley & Sons, 1998.

BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como Fazer Experimentos – Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. 4ª Ed.. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CANTOR, K. **Blown film extrusion: an introduction**. Munique: Carl Hanser Verlag, 2006.

CARNEVALLI. Disponível em: <<http://www.carnevalli.com>>. Acessado em: jan 2014.

KANAI, T.; CAMPBELL, G. A. **Film Processing**. Munich: Hanser Gardner Publications, 1999.

KOLARIK, R. **Modeling of Film Blowing Process for Non-Newtonian Fluids by using Variational Principles**. 2012. Ph. D. Thesis – Faculty of Technology Tomas Bata University in Zlín, Zlín, Czech Republic, 2012.

KOLARIK, R; ZATLOUKAL, M. Evaluation of Variational Principle Based Model for LDPE Large Scale Film Blowing Process, **Novel Trends In Rheology V**, Zlín, Czech Republic, v. 1526, p. 119-127, 2013.

MAJUMDER, Khokan Kanti. **Blown Film Extrusion: Experimental, Modelling and Numerical Study**. 2008. Ph. D. Thesis, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, RMIT University, Melbourne, 2008.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** São Paulo: Ed. Artliber, 2005.

VIGNOL, L. de C. **Desenvolvimento de modelos simplificados para o estudo da extrusão de polímeros.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

YAMANE, M. M. **Modificação das propriedades mecânicas do polietileno de alta densidade através de mistura com polietileno linear de baixa densidade.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) - Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ZATLOUKAL, M.; VLČEK J. Application of variational principles in modeling of the film blowing process for high stalk bubbles. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.** v. 133, p. 63–72, 2006.

ANEXO A – Dados do polímero utilizado na simulação

Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³), ρ	922
Viscosidade “Zero-Shear” (ZSV), (Pa.s), η_0	96503 (200°C) 26800 (220°C)
Tempo de relaxamento (s), λ	14,65 (200°C) 11,41 (220°C)
Energia de ativação de fluxo (°K), E_a	6845
Temperatura de cristalização (°C)	103
Propriedade extensional , ϵ	0,15
Propriedade de escorregamento da cadeia, ξ	0,147

ANEXO B – Código do Scilab para simulação e otimização do processo de extrusão de filme tubulares

```

function Otimiza()
    [xot,fot]=fminsearch(fobj,[1.5593539;194.16967;98.91613;33.399964;149.19153]);
    //Os valores usados em fminsearch são valores que devem ser fornecidos como ponto de
    partida da otimização.
    [xot,fot]=return(xot, fot);
endfunction

function Simula(vm, tm, pri, frp, vz)
//.....Constantes utilizadas na simulação.....//
rho=922; //Densidade (Kg/m³)
d0 = 200; //Diâmetro(mm)
a0=d0/2000; //raio (m)
r0=d0/2000; //raio (m)
h0=vm/1000; //Vão da Matriz (m)
Q=vz/(rho*3600); //Vazão Volumétrica (m³/s)
Ta=298; //Temperatura Ambiente (K)
//.....Dados do Polímero.....//
xn0L=[190;195;200;210;220];
yn0=[201500;183000;96000;35000;26800];
yL=[21.78;17.53;14.57;12.88;11.41];
//.....Interpolação dos Dados do Polímero.....//
dn0=splin(xn0L,yn0);
dL=splin(xn0L,yL);
n0=interp(tm,xn0L,yn0,dn0);
lamda=interp(tm,xn0L,yL,dL)//
//.....
Ce=(n0*Q)/(2*pi*(a0^2)*h0*rho*2300*Ta); //Coef. Adimensional de Dissipação de Energia
Ea=6860; //Energia de Ativação de Fluxo
B=(%pi*((r0)^3)*(pri))/(n0*Q); //Pressão Adimensional do Balão
RS = sqrt(((frp*r0)/(n0*Q))/B-3); //Razão de Sopro
A=((frp*r0)/(n0*Q))-B*(RS)^2; //Forção de Tração Adimensional
t0=((tm+273)-(Ta))/(Ta); //Temperatura Inicial da Matriz (Adimensional)
epsi=0.15; //
zeta=0.147; //
v0=Q/(%pi*(((r0)+(h0))^2)-(r0)^2)); //Velocidade inicial (m/s)

de = (lamda*v0)/(r0); //Número de Deborah
T11 = frp/(%pi*(((r0)+(h0))^2)-(r0)^2)); //Tensão Principal na direção da máquina
T33 = pri*(r0)/(h0); //Tensão Principal na direção transversal
t1 = r0*T11/(n0*v0); //Tensão Axial Adimensional ("Direção da Máquina")
t3 = r0*T33/(n0*v0); //Tensão Circunferencial Adimensional ("Direção Transversal")
x=0; //Altura referente à saída da matriz (Adimensional)
r=1; //Raio do filme na saída da matriz (Adimensional)
h=1; //Espessura na saída da matriz (Adimensional)
p=0;

yy=2.5;
yy0=sqrt(((t1/(A+B))^2)-1); //Ângulo Inicial do Filme na matriz

x=fsolve(0.001,fnew)
x=0:0.001:x;
x=x';
zr=ode([r;yy0;h;p;t1;t3;t0],0,x,df);
zr=zr';

for i=1:size(zr,1)
r(i)=zr(i,1);
y(i)=zr(i,2);
h(i)=zr(i,3);

```

```

p(i)=zr(i,4);
t1(i)=zr(i,5);
t3(i)=zr(i,6);
t(i)=zr(i,7);

dfi=df(x(i),[r(i);y(i);h(i);p(i);t1(i);t3(i);t(i)]);

e11(i)=1/(r(i)*h(i))*1/(sqrt(1+y(i)^2))*(-(1/h(i))*dfi(3)-(1/r(i))*y(i));
e33(i)=1/(r(i)*h(i))*1/(sqrt(1+y(i)^2))*y(i)/r(i);
hc(i)=0.084*3.5*(560-780*exp(-1.27*(t(i)*Ta)-0.035*r(i)))/(1+exp(x(i)));

end

// .....Resultados da simulação.....//
LF = %pi*r(size(r,1),1)*r0
disp("Largura do Filme é: " + string(LF) + " Metros" );
E = (h(size(h,1), 1))*h0
disp("Espessura do Filme é: " + string(E*1000) + " Milímetros" );
EstTotal11 = intsplin(x, e11)
disp("Estiramento Total Filme na direção 11:          " + string(EstTotal11));
EstTotal33 = intsplin(x, e33)
disp("Estiramento Total Filme na direção 33:          " + string(EstTotal33));
//.....//

[x,zr,r,y,h,p,t1,t3,t,e11,e33,hc,LF,E,EstTotal11,EstTotal33]=return(x,zr,r,y,h,p,t1,t3,t,e11,e33,hc,LF,E,EstTotal11,EstTotal33);

endfunction

//.....Equações diferenciais .....//
function [dy]=df(x, z)

r=z(1); y=z(2); h=z(3); p=z(4); t1=z(5); t3=z(6); t=z(7);

fb=(exp(Ea/(Ta)*(1/(1+t))-1/(1+t0)));
fr=y;
fy=((h*t3*sqrt(1+y^2)-2*r*B*(1+y^2))/(A+B*r^2));
fh=((y/r*(t3/t1-1)-(1-exp(epsil*de*(t1+t3+3*p))/fb)/de)+2*(1-zeta)*r0*(1/(r*h))*y/r*(1+p/t1)/(sqrt(1+y^2))+2*log(1/r*h^2)/((de^2)*t1)*h/(1-2*(1-zeta)*r0*(1/(r*h)))/sqrt(1+y^2)-4*(1-zeta)*1*p*(1/(r*h))/(t1*sqrt(1+y^2)));
fp=(p/de*(1-exp(epsil*de/fb*(t1+t3+3*p)))+2*(1-zeta)*p*(1/(r*h))*fh/(h*sqrt(1+y^2))-2*log(h)/de^2);
ft11=(t1/de*(1-exp(epsil*de/fb*(t1+t3+3*p)))-2*(1-zeta)*(t1*(1/(r*h))*(fh/h+y/r)/sqrt(1+y^2))-2*(1-zeta)*p*((1/(r*h))*(2*fh/h+y/r)/sqrt(1+y^2))-2*log(1/r*h^2)/de^2);
ft33=(t3/de*(1-exp(epsil*de/fb*(t1+t3+3*p)))+2*(1-zeta)*(1/(r*h))/r*t3*y/sqrt(1+y^2)+2*(1-zeta)*(1/(r*h))*p*(y/r-fh/h)/sqrt(1+y^2)-2*log(r/h)/de^2);
f1=((A+B*r^2)*sqrt(1+y^2)/(r*h));
ft=(Ce*(t3*y/r-t1*(fh/h-y/r))-(2*(%pi)*(r0^2)*(0.084*8.2*(560-780*exp(-1.27*(t*Ta)-0.035*r)))/(1+exp(x)))*r*sqrt(1+y^2)*t/(2300*(vz/3600)));

dy=[fr;fy;fh;fp;ft11;ft33;ft];
endfunction..

function [ynew]=fnew(xf)
    zr=ode([r;yy0;h;p;t1;t3;t0],0,xf,df);
    ynew=zr(2);
endfunction

//.....Função Desejabilidade.....//
function [yobj]=fobj(e)
vm=e(1)
tm=e(2)
pri=e(3)
frp=e(4)

```

```

vz=e(5)
disp(e, "[vm;tm;pri;frp;vz]")
simula(vm,tm,pri,frp,vz)
//Largura do Filme: Nominal-the-best (NTB)
U=1.5;
L=0.5;
T=1;
if L<=LF&LF<=T then
    d(1)=(LF-L)/(T-L);
elseif T<=LF&LF<=U
    d(1)=(LF-U)/(T-U);
else
    d(1)=0;
end;
//Espessura do filme:Nominal-the-best (NTB)
U=0.00015;
L=0.00005;
T=0.0001;
if L<=E&E<=T then
    d(2)=(E-L)/(T-L);
elseif T<=E&E<=U
    d(2)=(E-U)/(T-U);
else
    d(2)=0;
end;
//Estiramento Total(EstTotal11): Larger-the-better (LTB)
U=3;
L=1;
T=3;
if EstTotal11<L then
    d(3)=0;
elseif L<=EstTotal11&EstTotal11<=T
    d(3)=(EstTotal11-L)/(U-L);
else
    d(3)=1;
end;
////Estiramento Total(EstTotal33): Larger-the-better (LTB)
U=1.4;
L=1;
T=1.4;
if EstTotal33<L then
    d(4)=0;
elseif L<=EstTotal33&EstTotal33<=T
    d(4)=(EstTotal33-L)/(U-L);
else
    d(4)=1;
end;

disp(d, "[d1; d2; d3; d4]");
yobj=-(d(1)*d(2)*d(3)*d(4))^(1/4);
disp(-yobj, "desejabilidade")
endfunction

```

ANEXO C – Relação entre símbolos do modelo e do código

Símbolo no Modelo	Símbolo no Código
A	A
B	B
C	C
C_e	Ce
De	de
E_a	Ea
F_z	frp
h	H
H_c	hc
L	fl
\dot{m}	vz
ΔP	pri
r	R
Q	Q
T_a	Ta
ε	epsi
ζ	zeta
ρ	rho
λ	lambda
σ_{11}	T11
σ_{33}	T33
η_0	n0
r'	y
r''	fy
C'	ft33
L'	ft11