

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais – PPGE3M

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE SOPRO NA ESTRUTURA  
E PROPRIEDADES DE FILMES DE POLIETILENOS PRODUZIDOS  
PELO PROCESSO DE EXTRUSÃO TUBULAR**

Roberto Luiz Rodriguez Ferreira

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais – PPGE3M

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE SOPRO NA ESTRUTURA  
E PROPRIEDADES DE FILMES DE POLIETILENOS PRODUZIDOS  
PELO PROCESSO DE EXTRUSÃO TUBULAR**

Roberto Luiz Rodriguez Ferreira  
Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2012

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Ruth Marlene Campomanes Santana

Banca Examinadora:

---

Dr<sup>ª</sup>. Ana Cristina Fontes Moreira – Braskem

---

Prof. Dr. Enio Cesar Machado Fagundes – IFSUL Rio-Grandense – Sapucaia do Sul

---

Dr<sup>ª</sup>. Bianca Bairros Rabello da Silva – UFRGS

---

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

## DEDICATÓRIA

À energia que nos criou e nos tornou parte deste universo.

Ao amor e dedicação de nossos entes queridos, família,  
amigos e colegas que sempre nos apoiaram na caminhada.

Sem vocês teria sido impossível.

Com vocês foi bem mais fácil e gratificante.

## **Agradecimentos**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Primeiramente, meu reconhecimento ao incentivo dos colegas, Prof. Dr. Renato Mazzini Callegaro e Prof. Msc. Alex Fabiano Bueno. O poder de convencimento e os desafios que me apresentaram foram decisivos para iniciar esta etapa.

Agradeço à minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ruth Marlene Campomanes Santana pela sabedoria, dedicação e paciência com que me guiou nesta trajetória, e à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cléia de Andrade Salles, pelo incentivo e disponibilização da estrutura do campus de Sapucaia do Sul do IFSUL RIO-GRANDENSE.

Para José Eduardo Duarte Rodrigues, Nickolas Giroto e Bruna dos Santos minha gratidão pelo grande auxílio no processamento e na caracterização das amostras.

À Petroquímica Braskem, que proporcionou a matéria prima e caracterizações de amostras, agradeço através de sua colaboradora Maria Isabel Pereira Costa que sempre disponibilizou diligente atendimento e agilidade.

Aos meus colegas de pós-graduação pelo companheirismo e participação em seminários, estudos e pesquisas nas disciplinas do mestrado.

Deixo também registrado, o maior reconhecimento à minha família, pois sem o apoio dela seria impossível vencer esse desafio.

Enfim, a todos que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## Trabalhos Apresentados e Publicados

- Ferreira, R. L. R.; Rodrigues J. E. D.; Santana, R. M. C.; *Estudo da Influência da Composição das Blendas de PEAD/PEBD na Estrutura e Propriedades de Filmes Tubulares*; XX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT 2012; Joinville – SC, Brasil; 2012. p. 10049-10056, ISSN: 2179-328X.
- Foster, R. S.; Ferreira, R. L. R.; Santana, R. M. C.; *Correlação de Propriedades Físicas e Óticas de Filmes Planos de PEBDL Sob Diferentes Condições de Processamento*; XX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT 2012; Joinville – SC, Brasil; 2012. p. 11519-11526, ISSN: 2179-328X.
- Santos, B.; Ferreira, R. L. R.; Santana, R. M. C.; *Influência da Razão de Sopro e Composição de Blendas PEBD/PEAD nas Propriedades Óticas de Filmes Biorientados*; XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ 2012; Búzios – RJ, Brasil; 2012.
- Ferreira, R. L. R.; Santos, B.; Konarzewski, V. H. C.; Santana, R. M. C.; *Avaliação da Correlação de Estrutura e Propriedades de Filmes Biorientados de PEBD*; VI Congreso Internacional de Materiales - CIM 2011; Bogotá – Colômbia; 2011.
- Ferreira, R. L. R.; Giroto, N.; Salles, C. A.; Santana, R. M. C.; *Estudo da Influência da Razão de Sopro na Estrutura e Propriedades de Filmes Tubulares de PEBD*; IX Simpósio Argentino de Polímeros – SAP 2011; Bahía Blanca, Argentina; 2011.
- Ferreira, R. L. R.; *Assegurando Qualidade na Produção de Geomembranas de PEAD*; Revista Engenharia: São Paulo – SP – Brasil; nº 559 – 137; 2003.

## SUMÁRIO

1.	Introdução .....	15
2.	Revisão Bibliográfica .....	18
2.1.	Matéria Prima – Polietilenos .....	19
	Composição Molecular .....	22
	Distribuição de Peso Molecular .....	22
	Morfologia .....	23
	Propriedades Intrínsecas do Polietileno .....	24
	Aplicações do Polietileno .....	25
2.2.	Processamento .....	31
2.2.1.	Componentes do Processo de Extrusão .....	32
2.2.2.	Medições no Processo de Extrusão .....	37
2.2.3.	Processos de Extrusão de Filmes de Polietileno.....	39
	Matrizes.....	44
	Resfriamento.....	47
	Torre de Filme Tubular .....	49
	Bobinador.....	50
	Medição.....	51
	Operação .....	51
3.	Objetivo .....	56
4.	Materiais e Métodos.....	57
4.1.	Materiais.....	57
	Polietileno de Baixa Densidade - PEBD .....	57
	Polietileno de Alta Densidade - PEAD .....	57
4.2.	Metodologia.....	57
4.2.1.	Condições de Processamento.....	66
4.2.2.	Caracterização .....	66
4.2.2.1.	Ensaio Físicos .....	66
	Largura e Espessura.....	66
	Coefficiente de Fricção – COF.....	67
	Índice de Fluidez.....	68
4.2.2.2.	Ensaio Mecânicos – Ensaio de Tração.....	69
4.2.2.3.	Ensaio Térmicos .....	69
	Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC .....	69

	Monitoramento da Temperatura do Fundido no Processo .....	69
	Termografia.....	69
4.2.2.4.	Ensaio Óptico .....	71
	Microscopia Óptica - MO .....	71
	Ensaio Colorimétrico, Opacidade e Brilho .....	71
5.	Discussão dos Resultados.....	73
5.1.	Influência do Processamento nas Propriedades Físicas.....	73
5.2.	Análise da Dispersão de Espessuras dos Filmes.....	80
5.3.	Largura dos Filmes .....	90
5.4.	Coefficiente de Fricção – COF.....	90
5.5.	Índice de Fluidez.....	91
5.6.	Propriedades Mecânicas - Ensaio de Tração.....	92
5.7.	Propriedades Térmicas.....	102
	Calorimetria Diferencial Exploratória – DSC.....	102
	Termografia.....	106
5.8.	Propriedades Ópticas .....	108
	Microscopia Óptica – MO.....	108
	Colorimetria, Opacidade e Brilho .....	109
6.	Conclusões .....	113
7.	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	114
8.	Referências Bibliográficas .....	115

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b>	Esquema da cadeia industrial petroquímica [2] .....	18
<b>Figura 2.</b>	Estrutura química do polietileno puro [5] .....	19
<b>Figura 3.</b>	Esquema de diferentes classes de polietileno. (a) polietileno de alta densidade, (b) polietileno de baixa densidade, (c) polietileno linear de baixa densidade [5] .....	20
<b>Figura 4.</b>	Curva típica de distribuição de peso molecular do polietileno [5] .....	23
<b>Figura 5.</b>	Ilustração genérica de uma morfologia semicristalina [5] .....	23
<b>Figura 6.</b>	Imagens de algumas das aplicações do PEAD. Fonte: <a href="http://www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/polietileno.html">www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/polietileno.html</a> .....	26
<b>Figura 7.</b>	Imagens de algumas das aplicações do PEBD e PEBDL. Fonte: <a href="http://www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/polietileno.html">www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/polietileno.html</a> .....	27
<b>Figura 8.</b>	Esquema em blocos de um processo de extrusão .....	32
<b>Figura 9.</b>	Principais componentes de uma extrusora de rosca simples. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul .....	33
<b>Figura 10.</b>	Imagem de uma placa perfurada. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul .....	34
<b>Figura 11.</b>	Esquema do posicionamento das telas de filtragem. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul .....	34
<b>Figura 12.</b>	Esquema da posição das telas filtro com anel de retenção. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul .....	35
<b>Figura 13.</b>	Esquema do sistema de medição e controle da pressão. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul .....	35
<b>Figura 14.</b>	Imagem de um cabeçote/matriz para filmes tubos. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul .....	36
<b>Figura 15.</b>	Imagem de um cabeçote/matriz para filmes planos e chapas. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul .....	36
<b>Figura 16.</b>	Esquema de extrusora e equipamento pós-extrusão para produção de filmes tubulares. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul .....	37
<b>Figura 17.</b>	Esquema de extrusão de chapas com calandra de três cilindros [41] .....	40
<b>Figura 18.</b>	Esquema do processo de filme <i>casting</i> [41] .....	41
<b>Figura 19.</b>	Linha de filme tubular da <i>Maachi Sr.l.</i> [41] .....	43
<b>Figura 20.</b>	Esquema de um processo de filme tubular com seus principais componentes .....	43
<b>Figura 21.</b>	Esquema de três tipos de matriz mais usuais para filmes tubulares [41] .....	44
<b>Figura 22.</b>	Detalhe em corte de uma matriz de co-extrusão para três camadas, com alimentações laterais e distribuidores tipo helicoidais radiais, para filmes tubulares [48] .....	45
<b>Figura 23.</b>	Matriz de filme tubular da <i>Akron Extruders</i> [41] .....	46

<b>Figura 24.</b>	Anel de ar de lábio duplo [41] .....	46
<b>Figura 25.</b>	IBC – Tubo interno de resfriamento [41] .....	47
<b>Figura 26.</b>	IBC – Matriz de filme tubular da <i>Addex Inc</i> com anel de ar e IBC [41] .....	48
<b>Figura 27.</b>	<i>Brampton Engineering Inc., pancake IBC</i> [41] .....	49
<b>Figura 28.</b>	Linha de extrusão utilizada no estudo: marca Carnevalli, modelo B700, Série B, ano 1985.....	58
<b>Figura 29.</b>	Curva de correlação da indicação do instrumento do painel com a rotação real da rosca extrusora em rpm.....	60
<b>Figura 30.</b>	Curva de correlação da indicação do instrumento do painel com a velocidade de tiragem real do filme em m/min nos rolos do carro-puxador.....	61
<b>Figura 31.</b>	Curva de correlação da indicação do instrumento do painel com a velocidade de bobinagem real do filme em m/min na bobinadeira.....	62
<b>Figura 32.</b>	Curva de produção da linha de extrusão Carnevalli com PEBD TX 7003.....	63
<b>Figura 33.</b>	Configuração básica do equipamento usado para medir o COF de filmes plásticos [5] .....	68
<b>Figura 34.</b>	Ilustração do termovisor Fluke Ti10. Fonte: manual do instrumento.....	70
<b>Figura 35.</b>	Exemplo de um ajuste de definição da faixa e amplitude do termovisor Fluke Ti10. Fonte: manual do instrumento .....	70
<b>Figura 36.</b>	Exemplo de uma página do programa SmartView® para tratamento de uma imagem gerada pelo termovisor Ti10. Fonte: programa SmartView® .....	71
<b>Figura 37.</b>	Imagens dos filmes tubulares 100% PEBD com registro das alturas das linhas de névoa: 1A – 280mm e R.S = 1,5:1; 1B – 320mm e R.S. = 2,5:1 e 1C – 320mm e R.S. = 3,5:1 .....	79
<b>Figura 38.</b>	Imagens dos filmes tubulares 75% PEBD / 25% PEAD com registro das alturas das linhas de névoa: 2A – 180mm e R.S = 1,5:1; 2B – 180mm e R.S. = 2,5:1 e 2C – 270mm e R.S. = 3,5:1 .....	79
<b>Figura 39.</b>	Imagens dos filmes tubulares 50% PEBD / 50% PEAD com registro das alturas das linhas de névoa: 3A – 400mm e R.S = 1,5:1; 3B – 400mm e R.S. = 2,5:1 e 3C – 400mm e R.S. = 3,5:1 .....	79
<b>Figura 40.</b>	Imagens dos filmes tubulares 25% PEBD / 75% PEAD com registro das alturas das linhas de névoa: 4A – 500mm e R.S = 1,5:1; 4B – 500mm e R.S. = 2,5:1 e 4C – 400mm e R.S. = 3,5:1 .....	80
<b>Figura 41.</b>	Imagens dos filmes tubulares 100% PEAD com registro das alturas das linhas de névoa: 5A – 400mm e R.S = 1,5:1; 5B – 400mm e R.S. = 2,5:1 e 5C – 400mm e R.S. = 3,5:1 .....	80
<b>Figura 42.</b>	Distribuição de espessura do filme 1A: 100% PEBD, razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 82µm, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	82
<b>Figura 43.</b>	Distribuição de espessura do filme 1B: 100% PEBD, razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 60µm, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	82

<b>Figura 44.</b>	Distribuição de espessura do filme 1C: 100% PEBD, razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 52 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	83
<b>Figura 45.</b>	Distribuição de espessura do filme 2A: 75% PEBD / 25% PEAD, razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 66 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	84
<b>Figura 46.</b>	Distribuição de espessura do filme 2B: 75% PEBD / 25% PEAD, razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 49 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	84
<b>Figura 47.</b>	Distribuição de espessura do filme 2C: 75% PEBD / 25% PEAD, razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 60 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	85
<b>Figura 48.</b>	Distribuição de espessura do filme 3A: 50% PEBD / 50% PEAD, razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 61 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	85
<b>Figura 49.</b>	Distribuição de espessura do filme 3B: 50% PEBD / 50% PEAD, razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 60 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	86
<b>Figura 50.</b>	Distribuição de espessura do filme 3C: 50% PEBD / 50% PEAD, razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 51 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	86
<b>Figura 51.</b>	Distribuição de espessura do filme 4A: 25% PEBD / 75% PEAD, razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 65 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	87
<b>Figura 52.</b>	Distribuição de espessura do filme 4B: 25% PEBD / 75% PEAD, razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 56 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	87
<b>Figura 53.</b>	Distribuição de espessura do filme 4C: 25% PEBD / 75% PEAD, razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 48 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	88
<b>Figura 54.</b>	Distribuição de espessura do filme 5A: 100% PEAD, razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 61 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	88
<b>Figura 55.</b>	Distribuição de espessura do filme 5B: 100% PEAD, razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 45 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	89

<b>Figura 56.</b>	Distribuição de espessura do filme 5C: 100% PEAD, razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 48 $\mu$ m, limites de especificação de +/- 5% da espessura média .....	89
<b>Figura 57.</b>	Resultados de coeficiente de fricção interno/interno e externo/externo .....	91
<b>Figura 58.</b>	Índice de fluidez (190°C/5kg) do fundido das amostras de PEBD/PEAD com composições:100/0; 75/25; 50/50; 25/75 e 0/100.....	92
<b>Figura 59.</b>	Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEBD: 1A – RS: 1,5:1; 1B – RS: 2,5:1 e 1C – RS: 3,5:1 .....	93
<b>Figura 60.</b>	Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEBD/PEAD (75/25): 2A – R.S 1,5:1; 2B – R.S.: 2,5:1 e 2C – RS.: 3,5:1 .....	95
<b>Figura 61.</b>	Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEBD/PEAD (50/50): 3A – R.S 1,5:1; 3B – R.S.: 2,5:1 e 3C – RS.: 3,5:1 .....	97
<b>Figura 62.</b>	Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEBD/PEAD (25/75): 4A – R.S 1,5:1; 4B – R.S.: 2,5:1 e 4C – RS.: 3,5:1 .....	98
<b>Figura 63.</b>	Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEAD: 5A – R.S 1,5:1; 5B – R.S.: 2,5:1 e 5C – RS.: 3,5:1 .....	100
<b>Figura 64.</b>	Curvas de tração versus deformação de todas as formulações processadas, sempre na R.S.: 3,5:1.....	101
<b>Figura 65.</b>	Curvas de fluxo de calor versus temperatura dos filmes processados com PEBD, PEAD e das blendas PEBD/PEAD com RS de 1,5:1 .....	102
<b>Figura 66.</b>	Curvas de fluxo de calor versus temperatura dos filmes processados com PEBD/PEAD (com RS: 1,5:1; 2,5:1 e 3,5:1) nas composições: (a) 75/25; (b) 50/50 e (c) 25/75 .....	103
<b>Figura 67.</b>	Grau de cristalinidade das amostras de PEBD/PEAD com composições: 75/25; 50/50 e 25/75 com RS de: (a) 1,5:1; (b) 2,5:1 e (c) 3,5:1 .....	105
<b>Figura 68.</b>	Imagens dos filmes tubulares 75% PEBD / 25% PEAD com registro das temperaturas após a saída da matriz, - gradientes de vermelho (180°C) ao azul (~60°C), 2A – R.S.: 1,5:1, 2B – R.S.: 2,5:1 e 2C – R.S.: 3,5:1 .....	107
<b>Figura 69.</b>	Imagens dos filmes tubulares 50% PEBD / 50% PEAD com registro das temperaturas após a saída da matriz, - gradientes de vermelho (220°C) ao azul (~ 60°C), 3A – R.S.: 1,5:1, 3B – R.S.: 2,5:1 e 3C – R.S.: 3,5:1 .....	107
<b>Figura 70.</b>	Imagens dos filmes tubulares 20% PEBD / 75% PEAD com registro das temperaturas após a saída da matriz, - gradientes de vermelho (220°C) ao azul (~ 60°C), 4A – R.S.: 1,5:1, 4B – R.S.: 2,5:1 e 4C – R.S.: 3,5:1 .....	107
<b>Figura 71.</b>	Imagens dos filmes tubulares 100% PEAD com registro das temperaturas após a saída da matriz, - gradientes de vermelho (220°C) ao azul (~ 60°C), 5A – R.S.: 1,5:1, 5B – R.S.: 2,5:1 e 5C – R.S.: 3,5:1 .....	108
<b>Figura 72.</b>	Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica: 1A – R.S.: 1,5:1, 1B – R.S.: 2,5:1 e 1C – R.S.: 3,5:1 .....	108

<b>Figura 73.</b>	Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica: 2A – R.S.: 1,5:1, 2B – R.S.: 2,5:1 e 2C – R.S.: 3,5:1 .....	108
<b>Figura 74.</b>	Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica: 3A – R.S.: 1,5:1, 3B – R.S.: 2,5:1 e 3C – R.S.: 3,5:1 .....	109
<b>Figura 75.</b>	Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica: 4A – R.S.: 1,5:1, 4B – R.S.: 2,5:1 e 4C – R.S.: 3,5:1 .....	109
<b>Figura 76.</b>	Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica: 5A – R.S.: 1,5:1, 5B – R.S.: 2,5:1 e 5C – R.S.: 3,5:1 .....	109
<b>Figura 77.</b>	Imagem de amostras de filmes nas diferentes composições, com razão de sopro 1.5:1, onde se observa opacidade aumentando com o incremento de PEAD na composição .....	111
<b>Figura 78.</b>	Opacidade de todos os filmes processados .....	111
<b>Figura 79.</b>	Brilho de todos os filmes processados .....	112

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1.</b>	Projeção de demanda – Principais resinas termoplásticas (t/ano) [2].....	15
<b>Tabela 2.</b>	Quadro geral com o número total e distribuição por idade dos equipamentos que constituem o parque brasileiro de transformação de resinas plásticas [4] .....	16
<b>Tabela 3.</b>	Principais propriedades de diferentes tipos de polietileno [5] .....	24
<b>Tabela 4.</b>	Relação entre variáveis de processo e parâmetros geométricos de filmes tubulares [40] .....	55
<b>Tabela 5.</b>	Composição e simbologia dos filmes tubulares processados com diversas razões de sopro .....	59
<b>Tabela 6.</b>	Correlação da indicação do instrumento do painel com a indicação real da rosca em rpm.....	60
<b>Tabela 7.</b>	Correlação da indicação do instrumento do painel com a velocidade do puxador (m/min).....	61
<b>Tabela 8.</b>	Correlação da indicação do instrumento do painel com a velocidade da bobinad. (m/min).....	61
<b>Tabela 9.</b>	Produção da linha de extrusão Carnevalli com PEBD TX 7003.....	62
<b>Tabela 10.</b>	Exemplo de cálculo dos parâmetros iniciais de processamento para filmes 1A, 1 B e 1C .....	65
<b>Tabela 11.</b>	Dados de processamento dos filmes tubulares .....	66
<b>Tabela 12.</b>	Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 1A, 1B e 1C .....	73
<b>Tabela 13.</b>	Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 2A, 2B e 2C .....	74
<b>Tabela 14.</b>	Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 3A, 3B e 3C .....	75
<b>Tabela 15.</b>	Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 4A, 4B e 4C .....	76
<b>Tabela 16.</b>	Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 5A, 5B e 5C .....	77
<b>Tabela 17.</b>	Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEBD (1A – R.S.: 1,5:1, 1B – R.S: 2,5:1 e 1C – R.S: 3,5:1) .....	94
<b>Tabela 18.</b>	Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEBD/PEAD (75/25): (2A – R.S.: 1,5:1, 2B – R.S: 2,5:1 e 2C – R.S: 3,5:1) .....	95
<b>Tabela 19.</b>	Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEBD/PEAD (50/50) (3A – R.S.: 1,5:1, 3B – R.S: 2,5:1 e 3C – R.S: 3,5:1) .....	97
<b>Tabela 20.</b>	Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEBD/PEAD (25/75) (4A – R.S.: 1,5:1, 4B – R.S: 2,5:1 e 4C – R.S: 3,5:1) .....	99

<b>Tabela 21.</b>	Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEAD (5A – R.S.: 1,5:1, 5B – R.S: 2,5:1 e 5C – R.S: 3,5:1) .....	100
<b>Tabela 22.</b>	Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo de todas as formulações dos filmes processados, sempre na R.S.: 3,5:1.....	101
<b>Tabela 23.</b>	Resultados das curvas de DSC das amostras avaliadas .....	104

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AISI – *America Iron and Steel Institute*  
ASTM - *American Society for Testing and Materials*  
CEP – Controle estatístico de processo  
COF – Coeficiente de fricção  
 $D$  - Diâmetro do balão (mm);  
 $d$  - Diâmetro da matriz (mm).  
DM – Direção de máquina  
DPM – Distribuição de peso molecular  
DT – Direção transversal  
 $e$  - espessura da parede do filme  
 $F_{atd}$  – Força de atrito dinâmico  
 $F_{ate}$  – Força de atrito estático  
 $F_z$  = Força de tração na região da linha de névoa;  
IBC – *Internal Bubble Cooling* (Tubo interno de resfriamento)  
LIE – Limite Inferior de Especificação  
LME – Limite Médio de Especificação  
LSE – Limite Superior de Especificação  
 $m$  – Massa  
 $n$  – Índice da lei das potências  
 $P$  - Peso  
PBT – Polibuteno  
PE - Polietileno  
PEAD – Polietileno de alta densidade  
PEBD – Polietileno de baixa densidade  
PELBD – Polietileno linear de baixa densidade  
PET – Politereftalato de etileno  
PMMA – Polimetacrilato de metila  
PP - Polipropileno  
PS – Poliestireno  
PVC – Policloreto de vinila  
 $Q_{pro}$  - produção da linha de extrusão  
 $r$  - Raio da matriz;  
RC – Razão de conformação

RE – Razão de estiramento

R.S. – Razão de sopro

s - Abertura da matriz;

SI – Sistema internacional de unidades de medida

$S_{mf}$  - Tração na direção da máquina na linha de névoa

$S_{tf}$  - Tração na direção transversal na linha de névoa

$v_t$  - Velocidade de tiragem do filme pelos rolos puxadores

$v_e$  - Velocidade de escoamento do polímero na saída da matriz

$v_{tir}$  - velocidade de tiragem do filme

$\mu_e$  - COF estático

$\mu_d$  - COF dinâmico

$\xi$  - Taxa máxima de estiramento

$\Delta p$  - Pressão interna ao balão

$\Delta P$  - Variação de pressão no cabeçote

$\Delta Q$  – Variação de produção da extrusora

$\rho_{blenda}$  - densidade da blenda

$\rho_{PEBD}$  - densidade do PEBD

$\rho_{PEAD}$  - densidade do PEAD

%  $_{PEAD}$  - percentual mássico do PEAD

%  $_{PEBD}$  - percentual mássico do PEBD

%  $X_c$  – Percentual de cristalinidade

$2l$  - duas vezes a largura do filme tubular, ou seja, o perímetro do filme

## Resumo

Um dos principais processos de transformação de polietilenos é o de extrusão tubular de filmes, realizado em larga escala por uma infinidade de empresas dos mais variados portes. Inúmeras pequenas empresas buscam seu espaço na demanda de produtos utilizando-se de blendas poliméricas a fim de obter características apropriadas ao produto final. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é estudar a influência da razão de sopro (RS) na estrutura e propriedades de filmes de polietilenos de alto e baixo grau de cristalinidade produzidos pelo processo de extrusão tubular. No trabalho foram utilizados o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o polietileno de alta densidade (PEAD), respectivamente. Foram formuladas cinco composições de blendas de PEBD/PEAD nas proporções mássicas de 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 e 0/100 e processados numa linha de extrusão de filme tubular, com três razões de sopro de: 1,5:1; 2,5:1 e 3,5:1. Para avaliar a influência da composição das blendas poliolefinicas e da razão de sopro em suas propriedades, os filmes foram caracterizados através de ensaios físicos, ópticos, mecânicos, térmicos, reológicos, e morfológicos. Os resultados das propriedades físicas mostraram que o aumento da razão de sopro apresentou maior variação de espessuras no perímetro dos filmes tubulares. O coeficiente de atrito (COF) dos filmes diminuiu com o acréscimo do conteúdo de PEAD na blenda, e não teve variação significativa com o aumento da razão de sopro utilizada. Em relação às propriedades mecânicas, os filmes com maior teor de PEAD na blenda apresentaram maior resistência à tração e menores valores de deformação no escoamento em ambas as direções. As razões de sopro maiores apresentaram maior similaridade das tensões e das deformações entre as direções da máquina (DM) e transversal (DT). A razão de sopro ideal constatada para os filmes processados com PEBD puro e a blenda de PEBD/PEAD (75/25) está entre 2,5:1 e 3,5:1; com as blendas de PEBD/PEAD 50/50 e de 25/75 valor próximo a 3,5:1; e com PEAD puro valor maior e próximo a 3,5:1. Resultados de DSC mostraram que a blenda PEBD/PEAD com a composição de 25/75 apresentou melhor miscibilidade que as outras blendas. Os filmes de PEAD e as blendas com maior conteúdo de PEAD apresentaram opacidades maiores, e com relação ao brilho, os filmes de PEBD apresentaram maiores valores.

## Abstract

One of the main transformation processes of polyethylene is the blown film extrusion process, conducted by big scale of companies of all sizes. Numerous small factories seek its space demand for products using the polymer blends in order to obtain appropriate characteristics to the final product. In this sense, the goal of this work is to study the influence of blow-up ratio (BUR) in the structure and properties of polyethylene films of high and low degree crystallinity produced by blown film extrusion process. At this work, it was used, the low density polyethylene (LDPE) and high density polyethylene (HDPE), respectively. Five compositions were formulated in LDPE / HDPE blends, in weight ratios of 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 and 0/100, and processed on a blown film extrusion line with three blow-up ratios: 1.5:1, 2.5:1 and 3.5:1. To evaluate the influence of the composition of polyolefin blends and the blow-up ratio on their properties, the films were characterized by physical, optical, mechanical, thermal, rheological and morphological tests. The results of the physical properties showed a great variation in thickness of the perimeter of the tubular film with the increase in blow-up ratio. The coefficient friction (COF) of films decreased with increasing content of HDPE in the blend and it had no significative variation with increasing blow-up ratio used. Regarding mechanical properties, films with higher content of HDPE in the blend showed higher tensile strength and lower strain values in the yield point, in both directions. The largest blow-up ratios showed higher similarity of the tensions and strains between the machine direction (MD) and transverse direction (TD). The ideal blow-up ratio observed for films processed with LDPE and LDPE / HDPE blend (75/25) are between 2.5:1 and 3.5: 1, with the LDPE / HDPE blends 50/50 and 25/75 value close to 3.5:1, and with pure HDPE value greater and near of 3.5:1. DSC results showed that the LDPE / HDPE blend with composition 25/75 showed better miscibility than the others. The films of HDPE and blends with higher content of HDPE showed larger opacities, and with respect to brightness, LDPE films showed higher values.

## 1. INTRODUÇÃO

Os principais processos de transformação produtivos de plásticos são: a extrusão, a injeção e o sopro. Esses processos têm características distintas, tanto em valor agregado aos produtos como em uso de mão-de-obra intensiva e conseqüente produtividade dos funcionários. As empresas de extrusão normalmente produzem volumes maiores de produtos por hora-máquina ou por funcionário (ex. tubos de PVC para a construção civil). Por outro lado, esses produtos tendem a ter valor agregado menor. Já nos produtos injetados, há uma inversão dessas características. Normalmente esse processo requer uso de mão-de-obra mais intensiva, que por outro lado acaba por gerar produtos, em média, com maior valor agregado. Já o processo de sopro (ex. embalagens) tem características intermediárias nesses quesitos. Algo que realmente diferencia os produtos soprados é a necessidade da proximidade com o mercado consumidor, dado o elevado custo de transporte dos produtos. Os produtos soprados em geral ocupam muito espaço em relação ao peso transportado. Portanto, é bastante comum que empresas de sopro tenham unidades dentro das dependências de empresas consumidoras de seus produtos, com base em contratos de fornecimento de médio ou longo prazo. [1]

Na Tabela 1 se apresenta a projeção de demanda das principais resinas termoplásticas no Brasil, destacando-se a grande demanda das resinas de polietileno (PEAD, PEBD e PELBD), tratadas neste estudo [2].

**Tabela 1.** Projeção de demanda – Principais resinas termoplásticas (t/ano) [2].

<i>Resinas</i>	<i>2006</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>
PEAD	847.007	959.114	1.086.059	1.229.806	1.392.579	1.576.896	1.785.609
PEBD	645.100	698.571	756.473	819.175	887.074	960.602	1.040.223
PELBD	465.585	543.973	635.560	742.566	867.589	1.013.661	1.184.327
PP	1.347.754	1.555.300	1.794.806	2.071.195	2.390.146	2.758.213	3.182.960
PET	581.625	676.592	787.066	915.577	1.065.072	1.238.976	1.441.275
PVC	776.261	866.895	968.111	1.081.145	1.207.376	1.348.346	1.505.775
PS	335.761	367.619	402.500	440.690	482.504	528.285	578.411

Os polietilenos para os processos de extrusão fornecidos pelas petroquímicas são de alta densidade (PEAD), linear de baixa densidade (PELBD) e baixa densidade (PEBD), em diversos tipos (*grades*) e com incorporações variadas de aditivos, dependendo da aplicação final a que se destinam. Para processar estes polietilenos, acompanhando os avanços

obtidos pelas petroquímicas, os fabricantes de equipamentos ofertam ao mercado linhas de extrusão adequadas e específicas, com alto grau de automação.

O parque fabril brasileiro da transformação de filmes por extrusão é muito diversificado, existindo empresas transformadoras de grande porte com equipamentos sofisticados. Entretanto, a maioria é de pequeno porte com equipamentos de baixa qualidade, normalmente de fabricação caseira, ou muito antigos. A maior parte dos transformadores não consegue atualizar suas máquinas. Além do custo de aquisição elevado das linhas novas de extrusão, também o transformador busca por equipamentos versáteis, que consigam produzir embora em prejuízo da qualidade, diversos tipos de manufaturados que lhes permita maior gama de produtos, onde um compensa a sazonalidade de outro. Também, que sejam equipamentos de pequeno porte, de baixo consumo de energia e agilidade na troca de produção, e que consigam trabalhar com polietilenos de baixa e alta densidade e blendas diversas destes dois [3].

A revista, Plástico Industrial, acompanha através de pesquisas esporádicas a evolução do parque de máquinas para transformação de plásticos do mercado brasileiro. Em sua pesquisa mais recente, de outubro de 2008 [4], verifica-se que os equipamentos instalados de extrusão-balão (filme tubular) estão desatualizados, como pode ser visto na Tabela 2.

**Tabela 2.** Quadro geral com o número total e distribuição por idade dos equipamentos que constituem o parque brasileiro de transformação de resinas plásticas [4].

Tipo de equipamento	Quantidade total	Média de idade dos equipamentos (em anos)			
		0 a 4	5 a 9	10 a 19	20 ou mais
Injetoras	35.885	11.260 (32%)	10.169 (28%)	11.289 (31%)	3.167 (9%)
Sopradoras	6.946	2.371 (34%)	2.469 (36%)	1.770 (25%)	336 (5%)
Extrusoras-balão	4.535	1.195 (26%)	1.320 (29%)	1.761 (39%)	259 (6%)
Extrusoras para filmes planos e chapas	1.426	440 (31%)	479 (33%)	468 (33%)	38 (3%)
Extrusoras para tubos e perfis	4.008	1.166 (29%)	1.416 (35%)	1.263 (32%)	163 (4%)
Máquinas para filmes <i>casting</i>	105	75 (71%)	20 (19%)	10 (10%)	0 (0%)
Calandras/máquinas para <i>extrusion coating</i>	249	67 (27%)	115 (46%)	29 (12%)	38 (15%)
Termoformadoras	1.971	698 (35%)	870 (44%)	326 (17%)	77 (4%)
Rotomoldadoras	823	306 (37%)	354 (43%)	163 (20%)	0 (0%)
Moldadoras de EPS	641	86 (13%)	229 (36%)	125 (20%)	201 (31%)
Total	56.589	17.665 (31%)	17.441 (31%)	17.204 (30%)	4.279 (8%)

Os filmes de polietileno, produzidos por processo de extrusão tubular, se destinam à variadas aplicações, destacando-se entre elas, as de embalagens, sacarias, sacolas, filmes para construção civil, filmes e estufas agrícolas, silagem de grãos, biodigestores, geomembranas, etc. Em todas estas aplicações as propriedades mecânicas, térmicas e

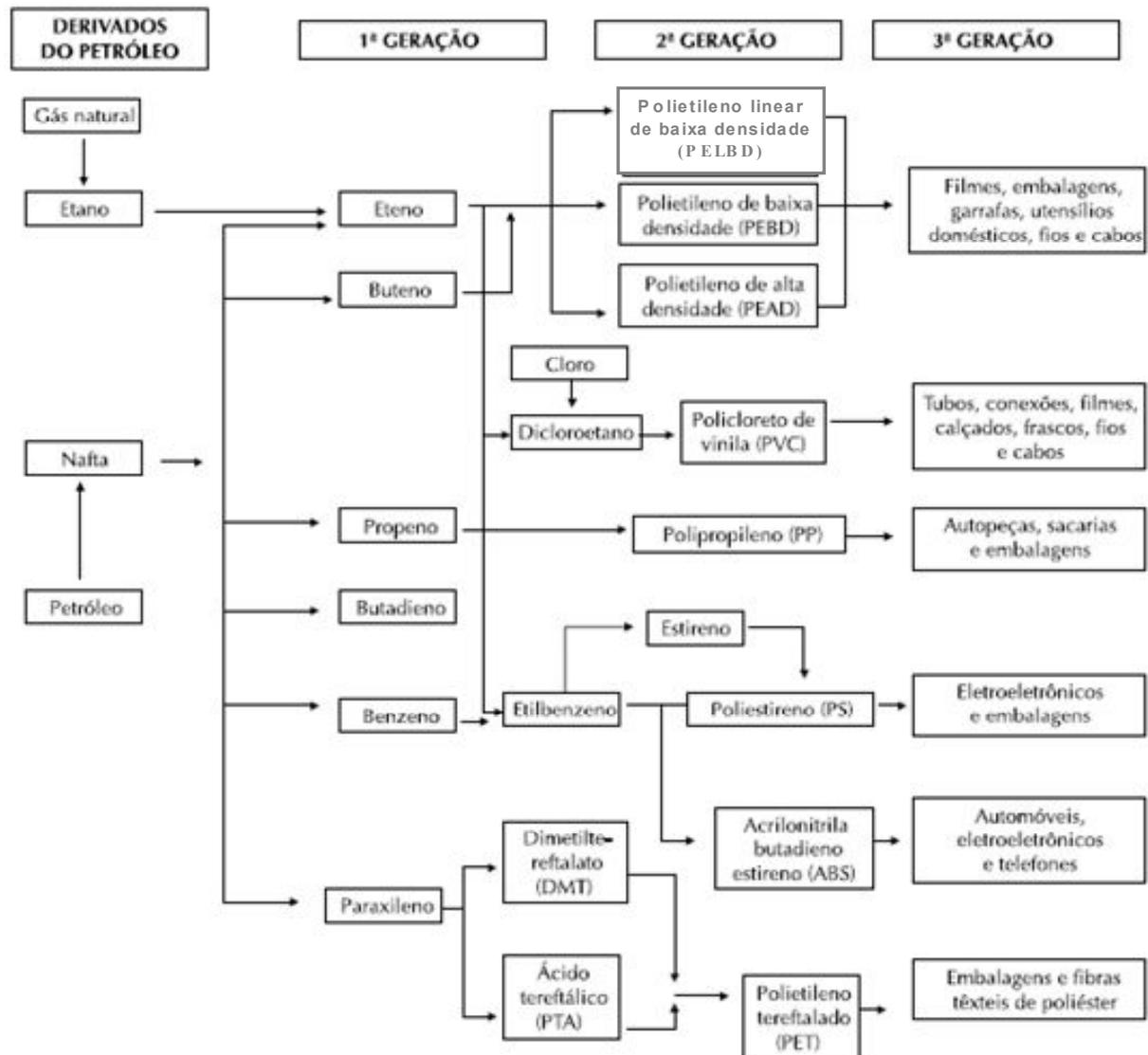
ópticas são muito importantes, sendo estas relacionadas com a estrutura química do polietileno e com as condições de processamento utilizadas, em especial a razão de sopro.

Conforme visto anteriormente, grande parte dos transformadores não possui os equipamentos adequados para processar todos os tipos de polietilenos capazes de fornecer a adequada propriedade pretendida ao produto final. Como, também muitas vezes uma só resina de polietileno não possibilita suprir todas as exigências da aplicação específica a que se destina o produto final, se faz necessário blendar (misturar) diferentes polietilenos que permitam alcançar este objetivo. Igualmente, nem sempre ocorre uma boa compatibilidade em todos os percentuais de composição de uma blenda, seja no processamento em si, como também nas respostas das propriedades resultantes.

Nesse sentido, este estudo está focado em analisar a estrutura e propriedades finais de filmes processados por extrusão tubular, com distintos polietilenos e suas blends, em diferentes razões de sopro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O setor de transformação de plásticos é parte integrante da complexa cadeia industrial petroquímica, que consta de três elos, a seguir descritos e mostrados esquematicamente na Figura 1.



**Figura1.** Esquema da cadeia industrial petroquímica [2].

A primeira geração são as centrais petroquímicas, que produzem petroquímicos básicos, provenientes da nafta e etano. Os principais produtos são eteno, propeno, butadieno, benzeno, tolueno e xileno. A segunda geração são os produtores de resinas termoplásticas, que, através de processos de polimerização, utilizam eteno, propeno, benzeno, xileno, entre outros, para a produção de polietileno, polipropileno, poliestireno,

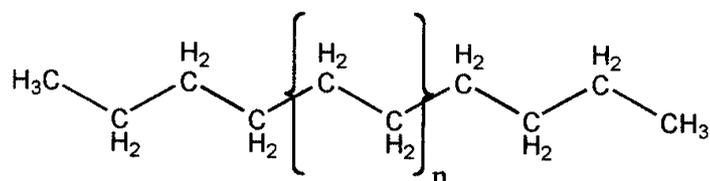
PVC, PET e outros. De forma geral, localizam-se próximos aos produtores de monômeros (primeira geração). Já a terceira geração são as empresas de transformação de resinas plásticas em produtos acabados, produzindo embalagens, peças e componentes plásticos, utensílios domésticos, entre outros, para diversos segmentos de mercado. Enquanto a primeira e segunda gerações são conectadas por dutos, situando-se, em sua maioria, próximas umas das outras, as empresas da terceira geração petroquímica tendem a localizarem-se mais próximas aos seus mercados consumidores.

A indústria de transformação de produtos plásticos tem a missão de transformar resinas termoplásticas em bens de consumo. A maior parte dedica-se a produzir peças e componentes para outros setores industriais, como o automobilístico, de eletroeletrônicos, de alimentos e de bebidas. Uma fração menor tem como destino de seus produtos os consumidores finais, atuando através de redes de varejo, como é o caso de produtos para construção civil, utilidades de copa-cozinha, descartáveis e brinquedos, entre outros.

Enquanto na indústria petroquímica de primeira e segunda geração, em média, para cada funcionário são produzidas cerca de 500 toneladas de produtos por ano, na indústria de transformação de produtos plásticos essa média é de aproximadamente 18 toneladas. Portanto, a terceira geração é a que tem maior potencial de geração de emprego, ainda que de menor qualificação. Disso também se conclui que, enquanto a indústria petroquímica é intensiva em capital, a indústria de transformação de produtos plásticos é intensiva em mão-de-obra [2].

## 2.1. Matéria Prima – Polietilenos

Na sua forma mais simples uma molécula de polietileno é constituída por uma longa espinha dorsal (cadeia principal) de átomos de carbono ligados covalentemente com um par de átomos de hidrogênio; as extremidades da cadeia são terminadas por grupos metila [5-10]. Esta estrutura é mostrada esquematicamente na Figura 2.



**Figura 2.** Estrutura química do polietileno puro [5].

Quimicamente resinas de polietileno puro consistem de alcanos com a fórmula  $C_{2n}H_{4n+2}$ , onde  $n$  é o grau de polimerização, ou seja, o número de monômeros de etileno polimerizados para formar a cadeia. Ao contrário de materiais orgânicos convencionais, o

polietileno não consiste de moléculas idênticas. Resinas de polietileno compreendem cadeias com uma gama de comprimentos distintos. Tipicamente, o grau de polimerização é bem maior que 100 e pode ser tão elevado quanto 250.000 ou mais, o que equivale a pesos moleculares variando de 1.400 a mais de 3.500.000. Polietilenos de baixo peso molecular (oligômeros) com um grau de polimerização entre 8 e 100 são sólidos cerosos que não possuem as propriedades geralmente associadas a um plástico. Quando o grau de polimerização é inferior a 8, alcanos são gases ou líquidos em condições normais de temperatura e pressão. Moléculas de polietileno podem ser ramificadas em vários graus e conter pequenas quantidades de insaturação [5-10].

Existem muitos tipos de polietileno, todos possuindo essencialmente a mesma cadeia principal de átomos de carbono; variações surgem principalmente a partir das ramificações que modificam a natureza do material. Existem muitos tipos de ramificações, que vão desde simples grupos alquila a funcionalidades de ácido e éster. Em uma menor extensão, variações surgem a partir de defeitos na cadeia principal do polímero; estas consistem, principalmente, de grupos vinila, que estão freqüentemente associados com as extremidades da cadeia. No estado sólido, ramificações e outros defeitos na estrutura da cadeia normal limitam o nível de cristalinidade de uma amostra. Cadeias que têm poucos defeitos têm um grau mais elevado de cristalinidade do que aquelas que possuem muitos defeitos [5-10].

À medida que o empacotamento de regiões cristalinas é maior do que a das regiões não cristalinas, a densidade global de uma resina de polietileno aumentará com a elevação do grau de cristalinidade. Geralmente, quanto maior a concentração de ramificações menor a densidade do sólido. As classes principais de polietileno, que são de interesse neste estudo, são ilustradas esquematicamente na Figura 3.



**Figura 3.** Esquema de diferentes classes de polietileno. (a) polietileno de alta densidade, (b) polietileno de baixa densidade, (c) polietileno linear de baixa densidade-[5].

O polietileno de alta densidade (PEAD) é quimicamente o mais próximo em estrutura ao polietileno puro. É constituído principalmente por moléculas não ramificadas, com poucas falhas para prejudicar a sua linearidade. A forma geral do PEAD é mostrada na Figura 3a.

Com um nível extremamente baixo de defeitos para impedir a sua organização, um elevado grau de cristalinidade pode ser alcançado, resultando em resinas que têm uma densidade elevada (em relação a outros tipos de polietileno). Algumas resinas deste tipo são copolimerizadas com uma concentração muito pequena de 1-alceno, a fim de reduzir ligeiramente o nível de cristalinidade. As resinas de PEAD têm densidades numa faixa de 0,94 a 0,97 g/cm<sup>3</sup> [5-10]. Devido ao seu nível muito baixo de ramificação, o polietileno de alta densidade é por vezes referido como polietileno (PE).

O polietileno de baixa densidade (PEBD) é assim chamado porque tais polímeros contêm concentrações significativas de ramificações que dificultam o processo de cristalização, resultando em densidades relativamente baixas. As ramificações consistem principalmente de grupos etila e butila em conjunto com uma longa cadeia de ramificação. Uma representação simplificada da estrutura do polietileno de baixa densidade é mostrada na Figura 3b. Devido à natureza da polimerização a alta pressão, processo pelo qual o polietileno de baixa densidade é produzido, as ramificações de etila e butila são freqüentemente agrupadas, separadas por trechos longos de cadeia principal não ramificada. Ramificações de cadeias longas ocorrem em intervalos aleatórios ao longo do comprimento da cadeia principal. As ramificações de cadeia longa podem, elas próprias, por sua vez serem ramificadas. As numerosas ramificações características das moléculas do PEBD inibem a sua capacidade para se cristalizar, reduzindo a densidade da resina em relação à do PEAD. Resinas de PEBD têm densidades na faixa de 0,90 a 0,94 g/cm<sup>3</sup> [5-10].

As resinas de polietileno linear de baixa densidade (PELBD) consistem em moléculas com cadeia principal de polietileno linear que estão ligadas a grupos alquila curtos em intervalos aleatórios. Estes materiais são produzidos pela copolimerização de etileno com 1-alceno. A estrutura geral de resinas de PELBD é mostrada esquematicamente na Figura 3c. As ramificações mais comumente encontradas são de grupos etila, butila, ou hexila, mas podem ser de uma variedade de outros grupos alquila, tanto lineares como ramificadas. Uma típica distribuição média de ramificações ao longo da cadeia principal é de 25 a 100 átomos de carbono. Resinas de PELBD podem também conter pequenos níveis de ramificações de cadeias longas, mas não no mesmo grau de ramificação complexa como a encontrada no PEBD. Quimicamente estas resinas podem ser imaginadas como um casamento entre o polietileno de alta densidade e o polietileno de baixa densidade, daí o seu nome. As ramificações impedem a cristalização em certa medida, reduzindo a densidade em relação ao PEAD. O resultado é uma faixa de densidade entre 0,90 a 0,94 g/cm<sup>3</sup> [5-10].

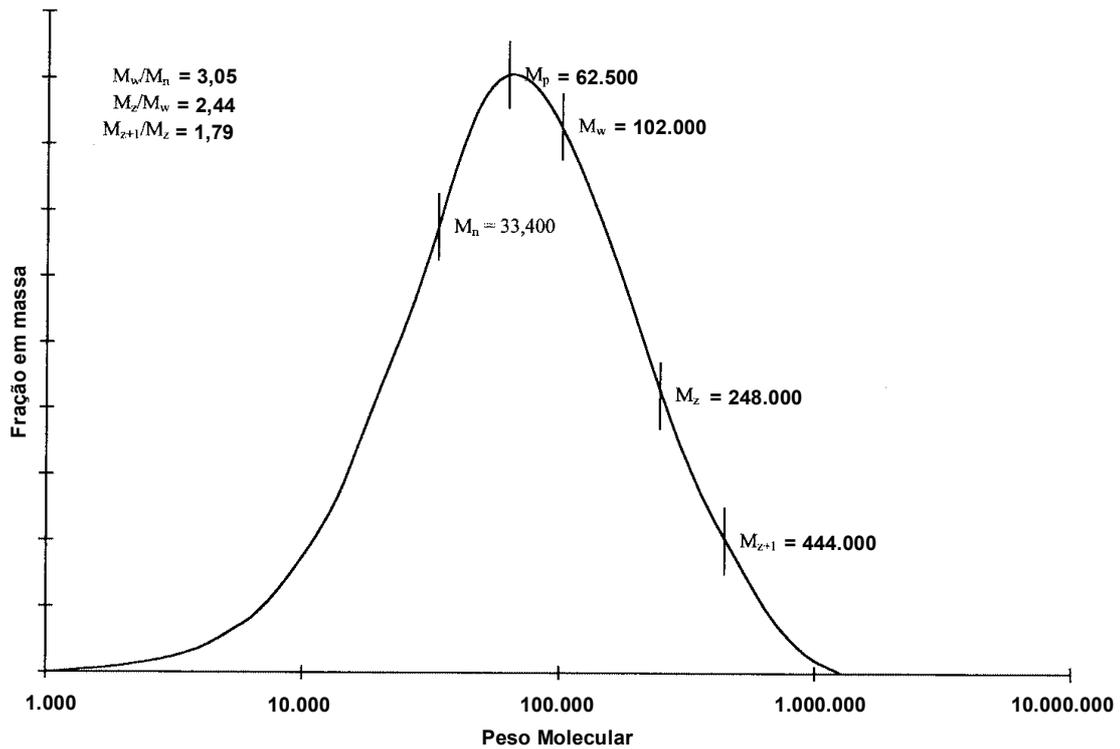
## **Composição Molecular**

Resinas de polietileno estão compostas por moléculas que exibem uma distribuição de comprimentos moleculares e ramificações características. As características de uma resina de polietileno podem ser descritas de maneira simples, se cada uma das moléculas que a compõem for definida em termos de seu exato comprimento da espinha dorsal e do tipo e colocação de cada ramificação. Isto não pode ser feito, porque as técnicas de separação não são adequadas para dividir qualquer resina da miríade de suas moléculas constituintes, nem podem as moléculas ser caracterizadas com precisão suficiente, mesmo se frações homogêneas pudessem ser obtidas. Na prática, é preciso calcular para determinar várias características médias que são representativas do peso molecular e distribuição das ramificações.

O tamanho de uma molécula de polietileno é normalmente descrito em termos de seu peso molecular. Todas as resinas de polietileno consistem de uma mistura de moléculas com uma faixa de pesos moleculares. O peso molecular médio e a distribuição dos comprimentos de cadeia afetam profundamente suas propriedades. Os pesos moleculares de moléculas encontradas em resinas comerciais podem variar desde cem até dez milhões [5-10].

## **Distribuição de Peso Molecular**

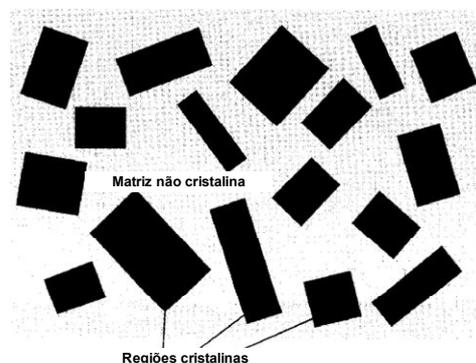
A distribuição de tamanhos moleculares de uma resina de polietileno pode ser descrita em termos de várias médias de pesos moleculares. As médias de pesos moleculares são calculadas como momentos de distribuição de massas moleculares. A distribuição de peso molecular (DPM) de uma resina de polietileno é normalmente traçada sobre uma escala semilogarítmica, com o peso molecular no eixo x e a fração em massa no eixo y. Tal gráfico é mostrado na Figura 4 onde a amplitude e a forma da curva de distribuição de peso molecular podem variar grandemente; parcelas de distribuição podem apresentar picos múltiplos, ombros e caudas. As características de peso molecular têm um profundo efeito sobre as propriedades físicas das resinas de polietileno, que afetam propriedades como a viscosidade, a quebra sobre tensão ambiental, e a resistência ao impacto.



**Figura 4.** Curva típica de distribuição de peso molecular do polietileno [5].

## Morfologia

O termo morfologia é usado para descrever a organização das moléculas do polietileno no estado sólido ou fundido. Uma descrição completa estrutural da morfologia de uma amostra de polietileno deve incluir termos que definem os níveis de ordem em todas as escalas, variando de angstroms até milímetros. No estado sólido do polietileno, existe uma morfologia semicristalina, isto é, o material contém algumas regiões que apresentam ordem de curto alcance normalmente associadas com cristais, intercaladas com regiões com pouca ou nenhuma ordem de curto alcance, ou seja, amorfas [5-10]. Uma estrutura esquemática semicristalina genérica é demonstrada na Figura 5.



**Figura 5.** Ilustração genérica de uma morfologia semicristalina [5].

## Propriedades Intrínsecas do Polietileno

Os vários tipos de polietileno apresentam uma vasta gama de propriedades, e atributos específicos, dependendo das características moleculares e morfológicas da resina de polietileno. Cada variante de polietileno tem suas próprias características, e dentro de cada tipo existe um espectro de propriedades. Há muita sobreposição entre as gamas de propriedades disponíveis para as diferentes variantes de polietileno. Uma comparação numérica dos diferentes tipos de polietileno, destacando as faixas típicas de algumas das principais propriedades de estado sólido, é apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3.** Principais propriedades de diferentes tipos de polietileno [5].

Propriedade	PEAD	PEBD	PEBDL
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,94 - 0,97	0,91 - 0,94	0,90 - 0,94
Grau de cristalinidade (% para a densidade)	62 - 82	42 - 62	34 - 62
Grau de cristalinidade (% para a calorimetria)	55 - 77	30 - 54	22 - 55
Módulo de flexão (MPa a 23°C)	1000 - 1551	241 - 331	276 - 1103
Módulo de tensão (MPa)	1069 - 1379	172 - 345	262 - 896
Tensão de escoamento (MPa)	18 - 31	9 - 19	8 - 19
Resistência à ruptura (MPa)	22 - 31	8 - 31	13 - 45
Elongação na ruptura (%)	10 - 1500	100 - 650	100 - 950
Dureza tipo Shore D	66 - 73	44 - 50	55 - 70
Temperatura de fusão (°C)	125 - 132	98 - 115	100 - 125
Calor de fusão (J/g)	159 - 222	88 - 155	63 - 180

Nenhum destes dados deve ser considerado absoluto, as condições de preparação e configurações específicas de teste, particularmente com respeito a espécimes orientadas, podem resultar em amostras cujas propriedades caíam fora das faixas indicadas. A seguir se descrevem algumas das características dos vários tipos de polietileno que se manifestam diretamente aos sentidos humanos.

As peças moldadas feitas a partir de PEAD são de materiais esbranquiçados opacos. A menos que tenha havido degradação térmica durante a moldagem, o PEAD não tem sabor ou cheiro perceptível e é o mais rígido de todos os polietilenos. A manipulação agressiva repetitiva pode produzir deformação permanente, com algum branqueamento na região da dobra. Os filmes finos têm um som característico nítido (como o do papel) quando manuseado e prontamente assume vincos permanentes. Quando esticados, os filmes deformam substancialmente criando pescoços, certas partes deformando mais do que outras, tornando-se esbranquiçado no processo. Uma vez perfuradas, finas películas de polietileno de alta densidade rasgam prontamente.

Itens moldados a partir de PEBD são geralmente translúcidos; a espessuras de até 3mm, uma folha de papel impressa diretamente em contacto é legível através do PEBD.

Possuem uma superfície macia, é bastante flexível, prontamente flexionado à mão, a espessura de até 3mm. As amostras mostram muita resiliência, raramente tomando forma permanente, a menos que deformada de forma substancial. Em comum com a maioria de outras resinas de polietileno, o PEBD não têm gosto ou odor ao menos que quimicamente alterado pela degradação ou algum outro processo. Filmes finos de PEBD deformam uniformemente quando esticados, com pouco ou nenhum clareamento das regiões tensionadas. Eles mostram deformação substancial antes do início de rasgamento, o que não se procede facilmente.

Peças moldadas a partir de resinas de PEBDL são geralmente de pouca opacidade. Não possuem uma superfície macia e não apresentam sabor ou odor perceptível. Dependendo do conteúdo de comonômero, podem variar de serem bem flexíveis até serem materiais rígidos que se dobram apenas ligeiramente antes que uma deformação permanente seja alcançada. A rigidez máxima exibida é apenas um pouco menor do que a mais suave das amostras de PEAD. Filmes finos de PEBDL se mostram bastante transparentes. Os filmes são resistentes a perfuração ou rasgamento. A deformação do filme é precedida por formação de pescoço da região tensionada, com a região deformada se tornando opaca [5-10].

### **Aplicações do Polietileno**

O polietileno, com seu largo espectro de propriedades físicas, é empregado em uma infinidade de aplicações. A chave para a sua adaptabilidade reside na sua morfologia semicristalina ajustável, que pode ser controlada através da manipulação molecular e das variáveis de processamento. Dureza, rigidez, transparência, e outras características físicas podem ser controladas alterando o seu peso molecular, o tipo e o conteúdo de comonômero. Resinas termoplásticas adequadas para processos de fabricação comerciais podem ser criadas através do controle do peso molecular, distribuição do peso molecular, e características de ramificações. A manipulação de polietileno antes e durante a cristalização também influencia suas propriedades de estado sólido. Resinas de polietileno podem assim ser adaptadas para muitas utilizações finais, em virtude de suas propriedades físicas e das características de processamento.

A natureza linear do PEAD permite o desenvolvimento de altos graus de cristalinidade, para dotá-lo de maior rigidez e a menor permeabilidade de todos os tipos de polietileno. Esta combinação torna-o adequado para muitas pequenas, médias e grandes aplicações de contenção de líquidos, como leite e garrafas de detergente, baldes, tambores e tanques de armazenamento de produtos químicos, conforme ilustrado na Figura 6. A sua

baixa permeabilidade, resistência à corrosão, e rigidez são atributos desejáveis para tubulações de água, esgoto, e transporte de gás natural, sendo estas algumas das suas principais aplicações. O PEAD, de boa resistência à tração o torna apto para aplicações de curto prazo como em filmes aplicados para sacolas de sustentação de carga, tais como sacos de supermercado e de lixo. Aplicações domésticas e comerciais de baixa capacidade de carga incluem recipientes de armazenagem de alimentos, engradados, paletes, cestos de lixo e brinquedos. Uma vantagem adicional em tais aplicações é a sua elevada resistência a abrasão. A resistência química e a baixa permeabilidade do PEAD em lâminas são exploradas na sua utilização como uma forração para valas de contenção de resíduos líquidos e sólidos [5-10]. Itens fabricados podem ser reticulados para melhorar ainda mais a sua resistência química e agressividade física em aplicações tais como armazenamento de produtos químicos em tanques e em embarcações pequenas.



**Figura 6.** Imagens de algumas das aplicações do PEAD.  
Fonte: [www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/polietileno.html](http://www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/polietileno.html)

As numerosas ramificações de cadeia curta encontradas no PEBD reduzem o seu grau de cristalinidade bem abaixo do PEAD, resultando em um produto flexível, com um baixo ponto de fusão. Ramificações longas conferem características desejáveis de processamento e de elevada resistência do fundido em conjunto com viscosidades relativamente baixas. Tais características eminentemente o tornam adequado para o processamento de filme tubular (soprado), produtos que determinam o seu uso principal, representando mais de metade de toda a sua aplicação. As principais aplicações incluem aplicações de baixa carga em embalagens comerciais e de varejo, e sacos de lixo. Outros usos incluem fraldas, invólucros, barreiras de vapor, cobertura de solo agrícola, e as estufas

agrícolas. O PEBD pode ser revestido sobre papelão para criar um compósito impermeável e soldável por calor, amplamente utilizado em sucos de frutas e embalagens de leite. Usos menores incluem isolamento de fios e cabos, e tubos flexíveis, ilustrados na Figura 7.

A classificação genérica de PELBD abrange um amplo espectro de resinas, que vão desde os elastômeros que são essencialmente amorfos para materiais opacos rígidos que partilham muitas das características do PEAD. A maioria do PELBD se encontra dentro do intervalo de densidade englobado pelo PEBD e, portanto, compartilha muito dos mesmos mercados. No reino do filme, que é a sua maior demanda, distingue-se por sua tenacidade superior. Esses filmes são utilizados em embalagens e muitos outros aplicativos, incluindo sacos de supermercado, pacotes de produtos frescos, filmes estiráveis, lixeiras, forros domésticos, e balões meteorológicos. É também extrudado para formar isolamento de fios e cabos, tubos, e lâminas para a utilização em aplicações onde a rigidez do PEAD não é necessária. Itens como tampas de alimentos, contêineres e brinquedos, onde a flexibilidade combinada com a tenacidade é necessária, são moldados por injeção. Numa escala maior, o PELBD é utilizado para recipientes de processamento de alimentos, tanques de armazenamento, e barreiras de construção de rodovias. Em níveis elevados de incorporação de comonômero, em que a cristalinidade é em grande parte suprimida, o PELBD é utilizado para que a transparência, a maciez, a recuperação elástica, e a dureza sejam acentuadas. Tais aplicações incluem o uso em produtos para a área farmacológica, como potes para soro e outras embalagens da área médica, tubulações, embalagem de carnes, e fraldas, ilustrados na Figura 7.



**Figura 7.** Imagens de algumas das aplicações do PEBD e PELBD.  
Fonte: [www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/polietileno.html](http://www.fotosearch.com.br/fotos-imagens/polietileno.html)

Tradicionalmente, o PEAD e o PEBD são misturados a fim de melhorar a processabilidade e as propriedades desejadas do produto final. Blendas destes polietilenos foram estudadas intensivamente nos últimos trinta anos [11]. A maioria dos trabalhos enfatiza que o interesse nas blendas de polietileno se baseia da necessidade de compreender as condições para a segregação e a miscibilidade das fases e de como melhorar suas propriedades específicas quando comparadas com a utilização de um só tipo de polietileno.

A mistura de dois ou mais polímeros diferentes é chamada de blenda. As blendas são preparadas para melhorar as propriedades dos produtos e reduzir custos [22]. As blendas podem ser homogêneas ou heterogêneas a nível microscópico, mas não devem exibir heterogeneidade macroscópica, que é considerada incompatível. As blendas são divididas em sistemas miscíveis e imiscíveis [23]. A mistura de dois polímeros diferentes, em geral, é imiscível [22]. Blendas miscíveis são as que apresentam interações favoráveis entre os segmentos das cadeias, sem a ocorrência de separação de fases. As blendas imiscíveis e compatíveis são as misturas que apresentam boa processabilidade e propriedades mecânicas desejáveis, sem apresentar interações específicas.

As blendas podem ser definidas como materiais poliméricos originados da mistura física de dois ou mais polímeros sem que haja um acentuado grau de reação química entre eles [12-14]. Blendas homogêneas em soluções sólidas dificilmente são formadas devido à imiscibilidade inerente à maioria dos pares de polímeros, oriunda de fatores termodinâmicos. Apesar dos pares poliméricos dificilmente formarem soluções sólidas homogêneas, é possível a preparação de sistemas com propriedades úteis, formando o que se chama de blendas compatíveis. Um dos principais objetivos da utilização de blendas é o de obter melhorias no custo/desempenho de plásticos comerciais, por vezes reduzindo o custo final do produto, seja pela melhor processabilidade ou também pela obtenção de propriedades específicas para determinado uso.

O termo compatibilidade pode por vezes ser considerado sinônimo de miscibilidade, o que não é correto. O melhor sinônimo para miscibilidade, no caso de estudo de blendas, seria solubilidade, pois uma blenda é dita miscível quando os segmentos moleculares dos componentes poliméricos se misturam intimamente não havendo qualquer segregação entre moléculas diferentes, ou seja, não ocorre separação de fase. Uma blenda polimérica miscível é uma solução de um polímero em outro, onde o polímero em maior concentração poderia ser chamado de solvente e o em menor concentração de soluto [12].

O termo solubilidade não é aplicado comumente no estudo de blendas devido ao fato que as primeiras blendas obtidas eram imiscíveis, onde o termo solubilidade não se

aplicaria. A descoberta de blendas totalmente miscíveis é bem mais recente, só então se passou a usar o termo miscibilidade. Blendas poliméricas podem ser miscíveis, parcialmente miscíveis ou imiscíveis dependendo do grau de interação entre os polímeros componentes.

Compatibilidade é um termo mais abrangente que a miscibilidade, e tem conotação tecnológica, visando indicar a possibilidade de mistura entre os componentes, em diversos graus e morfologias, usando-se técnicas apropriadas. Miscibilidade é uma propriedade termodinâmica intrínseca do par em questão, que pode ser descrita através de relações teóricas, e representa estados de mistura entre os componentes, em nível molecular. A compatibilidade é representada por estados de mistura onde as características finais da blenda podem ser manipuladas dentro de certos limites para se atingir um conjunto de propriedades desejadas. Blendas miscíveis são raras, mas as compatíveis são inúmeras. Um exemplo destas seria a mistura de um polímero quebradiço com um elastômero, com intuito de aumentar a resistência ao impacto. A borracha incorporada forma partículas imiscíveis dispersas na matriz rígida, que são capazes de absorver a energia gerada pelo impacto melhorando esta propriedade. O sistema obtido neste caso apresenta duas fases, a matriz formada pelo polímero rígido e a fase dispersa formada pelas partículas de borracha. Esta blenda é imiscível, no entanto, compatível por atender aos objetivos desejados. Um sistema incompatível é aquele formado por componentes que após a mistura apresentem propriedades desejadas inferiores às dos componentes individuais.

Blendas poliméricas miscíveis podem apresentar propriedades intermediárias entre as propriedades individuais dos componentes. No entanto blendas imiscíveis, compatíveis e incompatíveis, podem exibir variações tanto positivas como negativas em relação às propriedades individuais dos componentes.

A grande maioria dos estudos termodinâmicos foi desenvolvida para polímeros amorfos, ou seja, polímeros que não apresentam estruturas cristalinas, e, portanto, estas teorias não são aplicadas a polímeros cristalinos [12].

Os polímeros comerciais ditos cristalinos são na verdade materiais semicristalinos. A cristalinidade completa somente é conseguida em nível laboratorial (monocristais) e é muito importante em investigações de morfologia elementar. Na prática coexiste sempre com os cristais uma fase amorfa que não cristaliza, devido principalmente à fatores cinéticos. Esses sistemas com duas fases, amorfa e cristalina, possuem características de ambas, que são bastante distintas.

Quando um polímero cristalino é utilizado na preparação de blendas dificilmente será possível obter um sistema totalmente miscível. Este fato diminuí a possibilidade de se obter um sistema compatível. Blendas compatíveis onde pelo menos um componente é

cristalizável, geralmente são miscíveis no estado fundido, mas durante o resfriamento esta blenda se separa em duas ou mais fases.

Na preparação de uma blenda, onde um dos componentes cristaliza e o outro não, é possível ter quatro fases, representadas pela: parte cristalina do polímero cristalizável; parte amorfa do polímero cristalizável que não se mistura com o outro polímero; fase relativa à mistura das partes amorfas de ambos os polímeros; e a fase do polímero amorfo que não se mistura com a parte amorfa do polímero cristalino. No caso de uma blenda formada por dois componentes cristalizáveis seria possível obter seis fases [21]. Em estruturas como estas, ocorre a formação de um grande número de interfaces, que são regiões de concentração de tensões, reduzindo a possibilidade de compatibilidade neste tipo de blenda.

As propriedades físicas das blends poliméricas são extremamente dependentes da morfologia. As propriedades mecânicas e ópticas de blends com fases separadas são diferentes daquelas correspondentes à misturas homogêneas [24, 25]. O conhecimento dos parâmetros que governam a miscibilidade tem importância crucial na aplicação final. Entre os fatores que decidem se o sistema apresentará uma ou mais fases estão: o peso molecular dos polímeros constituintes, composição das blends e a interação física ou química entre as espécies. Para blends com polímeros semicristalinos, as propriedades finais tem grande dependência da estrutura cristalina, da morfologia das fases e da adesão interfacial.

Alguns dos aspectos mais importantes a serem avaliados em blends com componentes cristalizáveis são: a variação da temperatura de fusão; do grau de cristalinidade; do tamanho e forma dos esferulitos; e espessuras lamelares e interlamelares [26]. A variação da temperatura de fusão pode indicar a magnitude da interação polímero-polímero.

Nos últimos anos, especial atenção tem sido dirigida ao estudo de blends envolvendo polietilenos [11-26], com dupla motivação: geração de propriedades específicas de interesse tecnológico e entendimento científico das condições físico-químicas ligadas à miscibilidade ou à segregação de fase.

Em muitas composições de blends de PEBD com PELBD e PEAD são observadas cristalizações separadas dos componentes, com dois picos de fusão distintos. Por outro lado, blends de PEAD com PELBD ou PEBD podem apresentar co-cristalização onde os dois polímeros formam cristais isomórficos, ou seja, as cadeias de ambos os polímeros participam na formação do mesmo cristalito. A ocorrência de co-cristalização em blends poliméricas é pouco comum, sendo observada para alguns pares poliméricos.

Blendas de polímeros isomórficos são miscíveis em ambos os estados fundido e cristalino, e conseqüentemente apresentam apenas uma temperatura de fusão e transição vítrea. A possibilidade de formação de blendas de PE que apresentem co-cristalização depende principalmente do número e tamanho das ramificações. Estudos de simulação procurando avaliar o efeito das ramificações na estrutura morfológica de blendas de polietileno revelaram que haveria segregação e imiscibilidade no estado fundido em blendas de PEBD com PEAD, nas quais o PEBD apresenta mais de 30 ramificações longas para cada mil átomos de carbono [27].

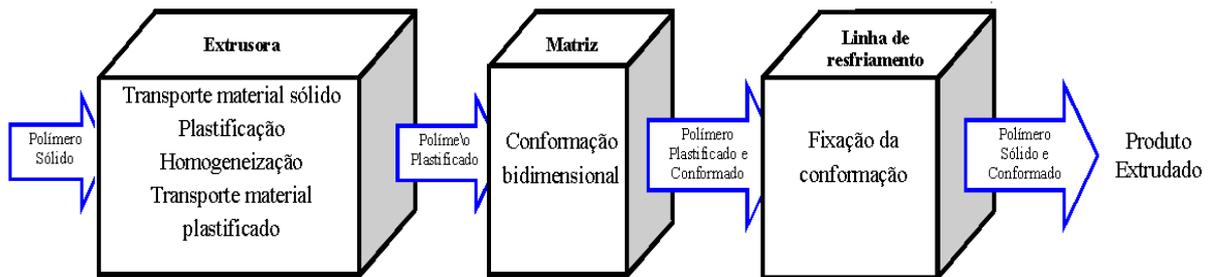
## **2.2. Processamento**

Existem variados tipos de processamento para polímeros. No caso específico de filmes, pode ser utilizada a extrusão, laminação ou, ainda, a moldagem por compressão térmica. Entretanto, o mais utilizado industrialmente é o processamento por extrusão, seja pela espessura dos filmes, como também pela rentabilidade que representa por ser um processo contínuo. A extrusão pode ser descrita como o processo em que o polímero fundido (plastificado) é moldado, continuamente, fazendo-o passar através de uma abertura (matriz) que possui a forma aproximada da seção transversal do produto desejado [28 - 40].

Em termos gerais, as funções da extrusora consistem em transportar material sólido, plastificar, homogeneizar e transportar material plastificado, e por fim, bombeá-lo por uma matriz. Desta forma, a extrusora funciona como uma bomba. Este bombeamento deve promover um fluxo uniforme e constante do polímero até a saída da matriz. Na matriz o material é conformado e logo após tem sua geometria fixada pelo sistema de resfriamento. Na Figura 8 se apresenta o processo de forma esquemática.

A otimização do processo de extrusão é atingida somente em situações em que haja um elevado grau de compatibilidade entre: o projeto do equipamento (extrusora); o projeto da ferramenta (matriz); as condições operacionais; e as características térmicas e reológicas dos compostos poliméricos.

Como dito anteriormente, no processo de extrusão o polímero é plastificado, homogeneizado e bombeado pelo sistema de plastificação (conjunto rosca/cilindro) através da matriz com fluxo o mais uniforme e constante possível de forma que o extrudado atinja a linha de resfriamento com dimensões adequadas. Os produtos transformados pelos processos de extrusão são perfis, capeamento de fios, filamentos, filmes planos e tubulares, tubulações, tarugos, semi-acabados, entre outros.



**Figura 8.** Esquema em blocos de um processo de extrusão.

### 2.2.1. Componentes do Processo de Extrusão

A máquina extrusora de polímero é composta de diversas partes que variam em sofisticação, número de elementos, dimensões e outros detalhes de projeto, conforme o tipo de processo de extrusão, grau de qualidade do produto final e produtividade exigida. Os tipos de extrusoras mais comuns são as extrusoras de rosca simples e rosca dupla. Na Figura 9 se observam os componentes principais de uma extrusora de rosca simples: (1) sistema de acionamento, (2) funil de alimentação, (3) sistema de plastificação (conjunto rosca/cilindro), (4) sistema de aquecimento/resfriamento, (5) conjunto de placa perfurada e telas filtro e (6) cabeçote/matriz de conformação.

O sistema de acionamento de uma extrusora (número 1 na Figura 9) pode ser simplesmente pensado como um motor elétrico (220, 380 ou 440 V), a transmissão/variação de velocidade (caixa redutora, sistema de polias, inversor de frequência, variador eletromecânico) e o acoplamento à rosca (flange). O sistema de alimentação ou funil de alimentação (número 2 na Figura 9) pode ser abastecido por processo manual ou automático: transportadores pneumáticos ou esteiras.

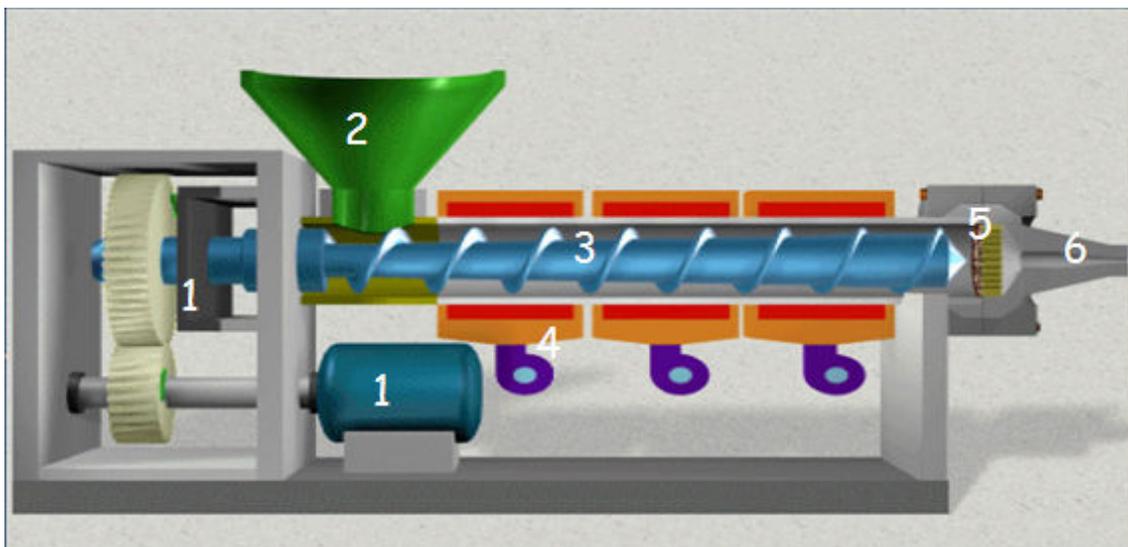
O polímero, na forma de grão ou pó, passa do funil de alimentação para a rosca pela ação da gravidade ou de maneira forçada. No funil de alimentação, podem ser acoplados sistemas de desumidificação, de dosagem de concentrados de resina/pigmento ou de resina/aditivos conhecido como *masterbatch*, de dosagem de mais de um tipo de resina (blendas poliméricas) e/ou controle de adição de material reciclado.

O sistema ou conjunto de plastificação é formado pelo conjunto rosca plastificadora/cilindro, conforme número 3 na Figura 9. O cilindro é a parte fixa do conjunto e deve ser fabricado de forma a suportar elevado desgaste por abrasão e por corrosão. São produzidos de diversos tipos de aço, com superfície interna geralmente tratada por nitretação ou bi-metálico. A superfície interna deve apresentar elevado coeficiente de atrito quanto ao contato com o polímero, podendo ser desenvolvidas ranhuras em sua superfície, na região de alimentação. Os materiais mais comuns para a manufatura do cilindro são liga

de aço 85:50, liga tipo Nitraloy 135M (nitretação com íons) que forma uma camada protetora contra corrosão e abrasão. A dureza na superfície interna do cilindro deve estar entre 55 e 72 Rockwell C, e a resistência à tração do aço deve estar entre 360 e 600 MPa. Também são utilizadas ligas Xaloy 800 constituídas de 25% ou mais de partículas de carbeto de tungstênio. A parte móvel, ou propriamente dita, a rosca, deve ser projetada para a máxima eficiência. Eficiência é tomada como uma função da vazão, da sua uniformidade, da durabilidade e da qualidade da plastificação e homogeneização.

Como vimos anteriormente sobre a otimização do processo de extrusão, estas características estão relacionadas ao comportamento de cada tipo de polímero e ao projeto do produto a ser processado. Portanto, o conjunto de plastificação não pode ser pensado isoladamente do projeto da matriz.

O sistema de aquecimento/resfriamento é normalmente subdividido em zonas de aquecimento, cujo número varia conforme a necessidade de diferenciar a temperatura ao longo da rosca (número 4 na Figura 9). A temperatura é controlada por malha fechada de sensor, controlador, sistema de aquecimento e sistema de resfriamento. O aquecimento pode ocorrer por resistências elétricas, vapor e óleo. Os sistemas elétricos são os mais utilizados para termoplásticos. O resfriamento pode ocorrer por convecção natural, mas quando houver necessidade de maior controle da janela de temperatura de processamento, o controle deve ser tipo convecção forçada (ventoinhas), circulação de água ou óleo por canais no cilindro ou até mesmo, pelo centro da rosca.



**Figura 9.** Principais componentes de uma extrusora de rosca simples. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio-Grandense – Campus de Sapucaia do Sul.

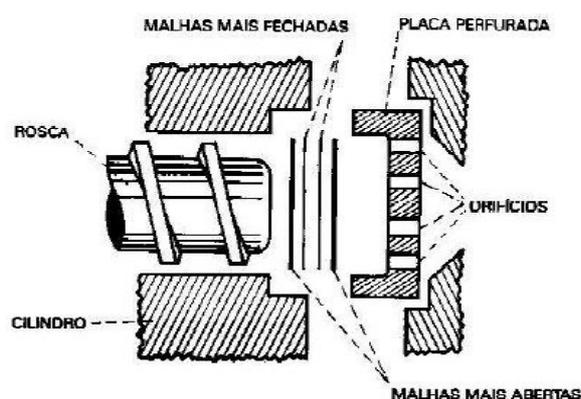
Nas extrusoras de rosca simples, a maior parte do calor necessário para o aquecimento do polímero é proveniente do atrito entre o polímero e as superfícies metálicas

e, também, devido ao atrito entre as partículas de polímero. Entre o conjunto de plastificação e o cabeçote/matriz há a placa perfurada, ou placa de quebra fluxo (número 5 da Figura 9). A placa perfurada consiste de um disco de aço com orifícios de diâmetro entre 3 a 5mm, mostrada na Figura 10, e deve ser projetada sem pontos de estagnação. Na placa perfurada são montados os conjuntos de telas de filtragem de aço inoxidável. As funções desta placa e das telas de filtragem são a de aumentar a pressão de contra-fluxo (ou retorno), quebrar o fluxo rotacional e filtrar as impurezas que porventura possam existir no polímero fundido.

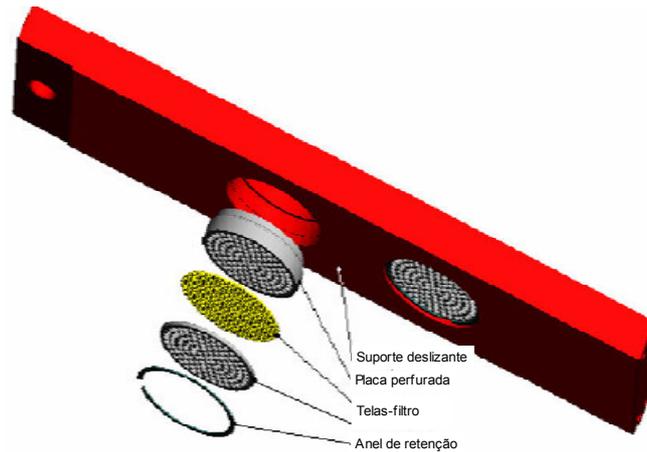


**Figura 10.** Imagem de uma placa perfurada. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul.

O sistema de filtragem da massa polimérica consiste em uma malha metálica disponível em vários tamanhos de furos (unidade de medida em *mesh* = quantidade de furos/polegada quadrada) que agem como filtro para retirar do material fundido as partículas de material não plastificado e outros tipos de impurezas. Em geral aumentam a pressão de contra-fluxo dependendo do seu tamanho. O sistema de filtragem consiste em um sanduíche de telas com aberturas diferentes, conforme mostrado na Figura 11, onde as externas são as que apresentam malhas mais abertas (menores *mesh*), enquanto que as internas são as mais fechadas (maiores *mesh*). Podem, ainda, incluir um anel de retenção conforme pode ser observado na Figura 12.

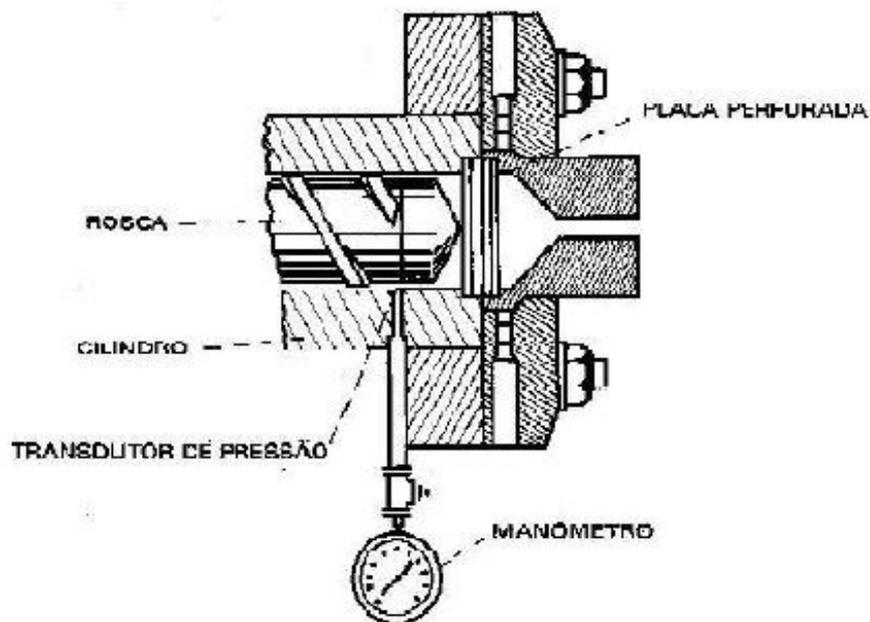


**Figura 11.** Esquema do posicionamento das telas de filtragem. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul.



**Figura 12.** Esquema da posição das telas filtro com anel de retenção. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul.

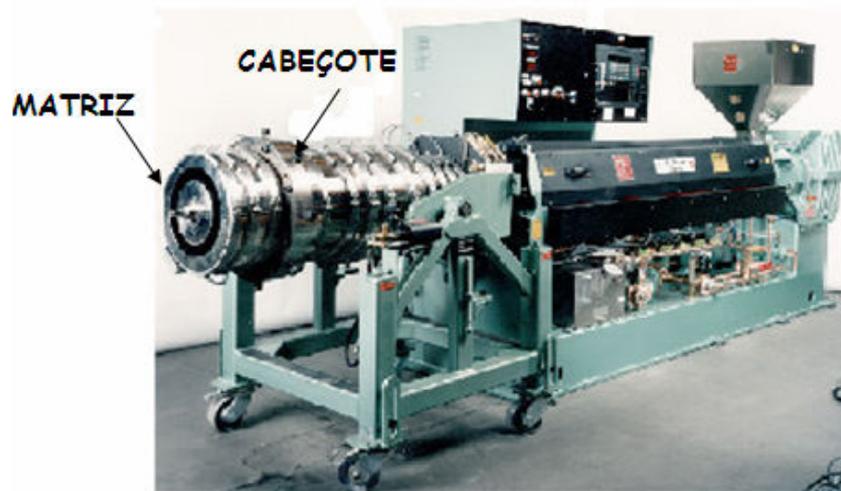
Quando a tecnologia do equipamento incluir um sistema de medição e controle do processo pela pressão, a posição do transdutor de pressão e do manômetro deve ser antes do sistema de telas filtro, conforme Figura 13.



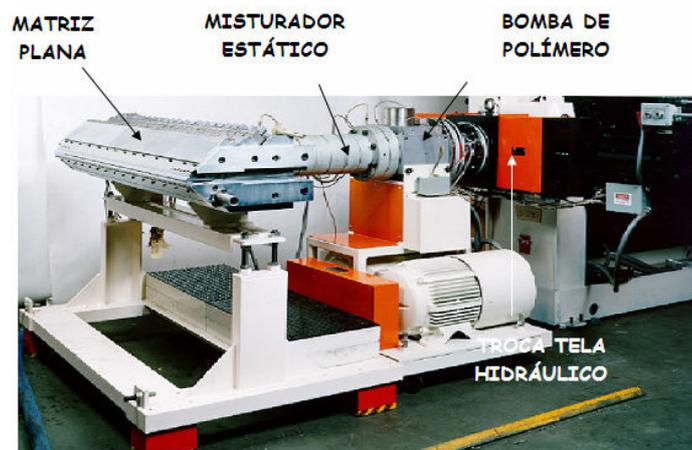
**Figura 13.** Esquema do sistema de medição e controle da pressão. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul.

Após a placa perfurada encontra-se o sistema composto pelo cabeçote e pela matriz (número 6 da Figura 9). Cabeçote é o ferramental que fica após a rosca e a matriz é a extremidade final do cabeçote que tem como função dar forma à massa polimérica. O cabeçote pode demandar um projeto simples como aquele apresentado pela maioria das

extrusoras de reciclagem ou complexos como os apresentados por sistemas de extrusão de filmes multicamadas tubulares, planos, tubulações, etc., conforme mostrado nas Figuras 14, e 15.

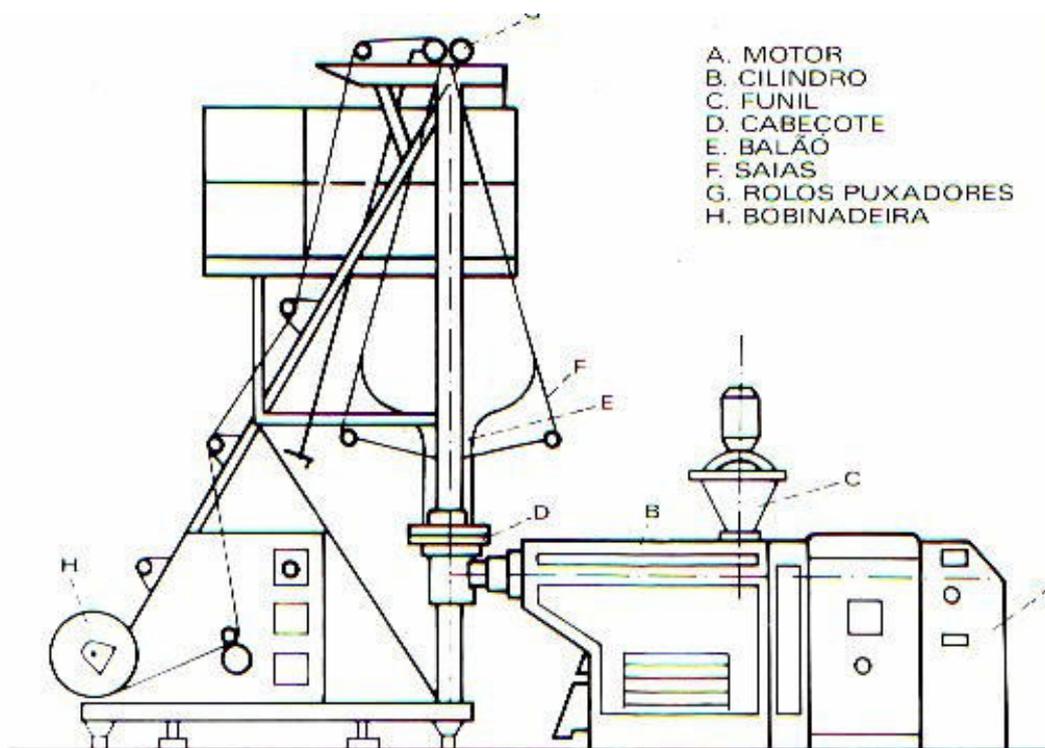


**Figura 14.** Imagem de um cabeçote/matriz para filmes tubos. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul.



**Figura 15.** Imagem de um cabeçote/matriz para filmes planos e chapas. Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul.

Os sistemas de pós-extrusão apresentam níveis de complexidades inerentes ao projeto do produto e à qualidade exigida. São operações encontradas nos sistemas de pós-extrusão: calibração, normalização, estiragem, corte, bobinamento. A seguir, na Figura 16, pode ser observado o sistema de pós-extrusão para filmes tubulares.



**Figura 16.** Esquema de extrusora e equipamento pós-extrusão para produção de filmes tubulares.  
 Fonte: Polígrafo de Extrusão do IFSUL Rio- Grandense – Campus de Sapucaia do Sul.

### 2.2.2. Medições no Processo de Extrusão

O grau de controle do processo que pode ser alcançado no processo de extrusão é determinado fortemente por como as medições são feitas. Isto significa não somente a medição dos parâmetros apropriados do processo, mas também ao usar os sensores e os transdutores certos e colocá-los na posição correta [37, 38].

Em um processo típico de extrusão há entre 5 e 10 parâmetros de processo que devem ser monitorados para controlar o processo e para assegurar a consistência. Os parâmetros mais importantes, mais ou menos em ordem de prioridade, são:

- As dimensões do extrudado;
- A pressão do cabeçote (depois do filtro);
- A pressão do cilindro (antes do filtro);
- A temperatura da massa fundida do polímero;
- O consumo de potência do motor;
- A velocidade da rosca;
- A velocidade de tiragem;
- O consumo de potência das várias zonas de aquecimento;
- A taxa de resfriamento de cada zona de resfriamento;
- As temperaturas da extrusora e da matriz.

As duas medições mais importantes são as dimensões do produto e a pressão do cabeçote. Obviamente, as dimensões do produto têm que ser monitoradas para certificar-se de que o produto está dentro das especificações dimensionais. O método preferido deve ser a medição em linha de forma contínua, isto é, para usar a monitoração em tempo real. Se os dados da medição forem alimentados a um computador, então médias, escalas, limites de controle, desvios padrão, e assim por diante, podem ser calculados quase instantaneamente. Assim os gráficos de controle podem ser gerados e indicados dentro de poucos segundos da medição real. Isto fornece o CEP (controle estatístico de processo) em tempo real e pode ser muito útil na monitoração e no controle exato do processo.

Várias técnicas de medição estão disponíveis para determinar as dimensões do produto extrudado. Elas estão baseadas em medições a laser, ópticas, eletromagnéticas, ultra-som, indutivas, e as pneumático-indutivas. As primeiras três são usadas na maior parte para determinar dimensões exteriores de produtos extrudados; as últimas quatro são usadas para medir a espessura de parede. Os medidores a laser são usados freqüentemente para medir o diâmetro exterior de mangueiras, tubos, e de fios revestidos. A definição varia de 0,001 a 0,01mm, dependendo da escala [38].

A escolha do método de medição dependerá de diversos fatores, tais como a forma e as dimensões do produto, a tolerância, o custo do instrumento, adequação do usuário, e assim por diante. A medida das dimensões do produto é freqüentemente a medida mais crítica no processo. Em consequência disso, o instrumento deve ser submetido a um estudo cuidadoso para certificar-se de que seja aceitável para a aplicação.

A medida da pressão é importante por duas razões principais: controle e segurança do processo. A pressão do cabeçote, isto é, a pressão depois do filtro, determina a produção. Uma pressão constante originará uma produção constante; entretanto, uma pressão variando resultará em uma produção oscilando. A produção propriamente dita não é facilmente medida no processo de extrusão. Entretanto a pressão pode ser facilmente medida. O mais importante é determinar como a pressão do cabeçote muda com tempo; a simples leitura instantânea da pressão não é muito significativa.

A mudança de produção,  $\Delta Q$ , resultando de uma mudança na pressão do cabeçote,  $\Delta P$ , pode ser determinada pela seguinte equação [38]:

$$\Delta Q (\%) = \Delta P (\%) / n \quad (1)$$

Onde,  $n$  é o índice da lei de potência do material.

Para o polímero fundido o  $n$  varia entre 0 e 1; para a maioria dos polímeros a escala é de 0,3 a 0,7. Isto significa que uma flutuação da pressão de 2% para um polímero com um índice  $n = 0,4$  da lei de potência resultará em uma flutuação da saída de 5%. Ou seja, a oscilação da produção é consideravelmente maior do que a da pressão. Isto é verdadeiro para todos os polímeros. As flutuações da produção tenderão a causar variações nas dimensões extrudadas do produto. Assim é muito importante manter a flutuação da pressão tão pequena quanto possível [38].

O aspecto de segurança da medição da pressão é criticamente importante. Sob determinadas circunstâncias (por exemplo, partidas a frio) uma extrusora pode gerar altas pressões, que são perigosas, quando excedem 70MPa. Se nenhuma segurança como o alívio de pressão estiver atuando, tais pressões podem arrancar o cabeçote da extrusora em alta velocidade. O operador que estiver no trajeto deste cabeçote será provavelmente severamente ferido. Todas as extrusoras devem ser equipadas com um dispositivo de alívio de pressão, tal como um disco de ruptura mecânico ou um pino de ruptura, que rompa ao atingir o valor limite. Infelizmente, este não é sempre o caso. Assim para o controle do processo a pressão medida depois do filtro é a mais importante, enquanto que para a segurança a pressão imediatamente antes do filtro é a mais importante. É aconselhável, conseqüentemente, ter ao menos dois transdutores de pressão em uma extrusora. A diferença nas duas leituras de pressão é uma boa medida do acúmulo de contaminação no filtro, que proporciona a informação para a limpeza e/ou troca de telas de filtragem.

A produção da extrusora é determinada diretamente pela velocidade da rosca. É importante, conseqüentemente, que a velocidade da rosca possa ser exatamente medida e controlada. Outra consideração importante é a relação da velocidade da rosca e da velocidade de tiragem. O bom ajuste da velocidade é igualmente importante para a tiragem. Se a produção da extrusora for constante, mas a velocidade de tiragem estiver variando, as dimensões do extrudado variarão também. Recomenda-se, conseqüentemente, que a extrusora e o equipamento de tiragem estejam equipados com motores que forneçam um ajuste de velocidade de 0,01% ou mais da escala total [38].

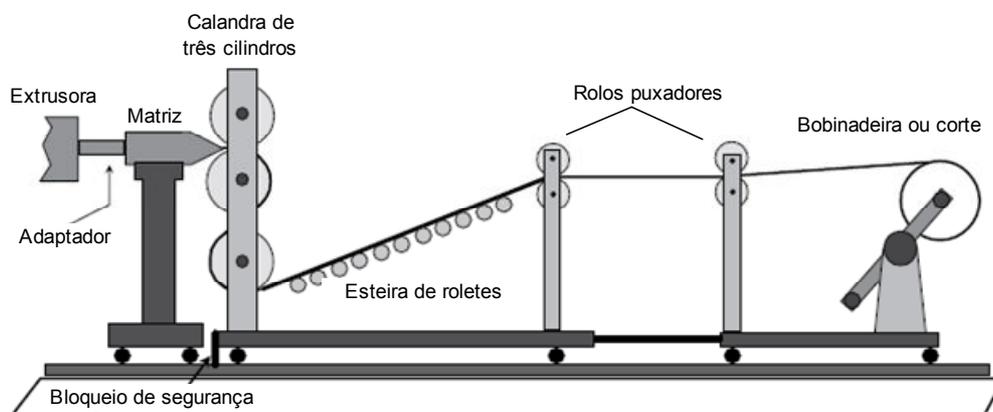
### **2.2.3. Processos de Extrusão de Filmes de Polietileno**

Existem três processos consolidados para a produção de filmes de polietileno, com características diferenciadas, em consonância com os objetivos de aplicação do produto final. São eles: a extrusão com matriz plana e calandragem, extrusão com matriz plana de filme “*casting*” e a extrusão tubular (filme soprado) [41–47].

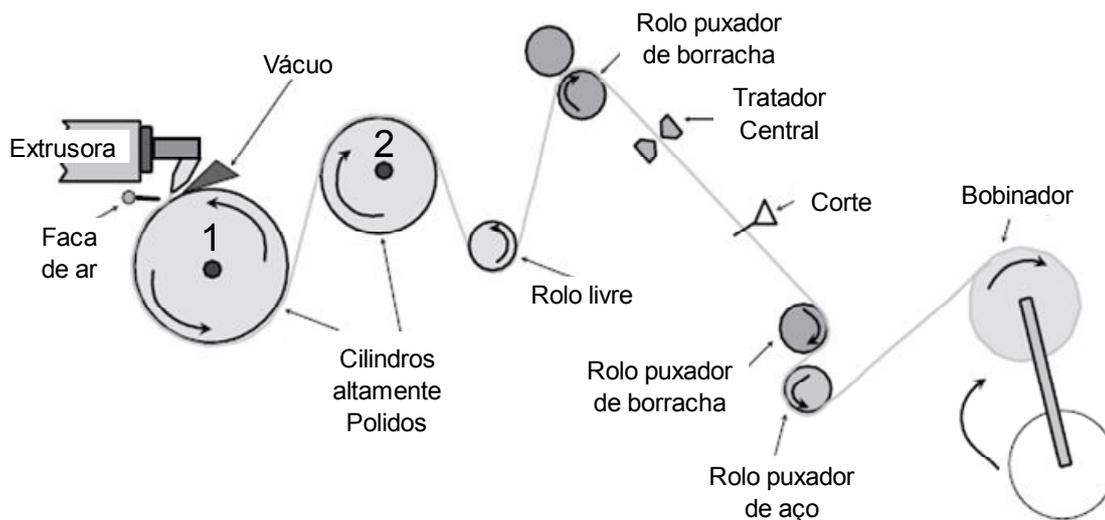
O filme plano é utilizado em embalagens, substrato de embalagens alimentícias, como revestimento protetor, filme agrícola, para controle de ervas daninhas, filme de polietileno de uso geral, como uma proteção de barreira para evitar arranhões de peças durante o transporte, e muitas outras aplicações.

O equipamento para a produção de chapas e filmes pode ser ligeiramente diferente, dependendo da espessura do produto. Uma linha de extrusão de chapas é mostrada na Figura 17. A velocidade da linha é sincronizada para impedir que os rolos puxadores atuem com velocidade muito maior que a dos cilindros de calandragem, conferindo orientação molecular ou tensão excessiva entre a calandra e os rolos puxadores. É mostrada uma bobinadeira rotativa, que automaticamente dirige a lamina para formar a bobina seguinte quando uma já se completou.

A Figura 18 mostra uma linha de filme *casting* com dois cilindros polidos, rolos puxadores, o tratamento central, corte, e usando um bobinador duplo. O cilindro número 1 na Figura 18 é o de *casting*, e é maior do que o cilindro número 2. O polímero fundido, fluindo da matriz para baixo em toda a superfície do cilindro, é rapidamente solidificado devido à temperatura do cilindro e da espessura do filme prevenindo ou controlando a cristalização das resinas semicristalinas. Este processo fornece claridade óptica exigida para os filmes de embalagens produzidas usando a tecnologia de filme *casting* de alto brilho, com altas taxas de produção, e bom controle dimensional. Em comparação com o filme tubular soprado, a variação de espessura no filme *casting*, com ajuste automático da matriz, é de  $\pm 1$  a 2%, enquanto no filme tubular soprado é normalmente de  $\pm 3$  a 4%. As aplicações de filme *casting* incluem: embalagem de alimentos: mercadorias cozidas, doces, queijos e carnes; em aplicações medicinais para empacotamento descartável; filme gravado e normalmente utilizado em fraldas; etiquetas; filme estirável; embalagem a quente de malas; geomembranas.



**Figura 17.** Esquema de uma linha de extrusão de chapas com calandra de três cilindros [41].



**Figura 18.** Esquema do processo de filme *casting* [41].

O filme tubular, ou filme soprado, é mais um processo usado para obter filme termoplástico em volume elevado. O processo é diferente do processo de filme *casting* discutido anteriormente, no projeto da matriz e no sistema de resfriamento. As chapas e filmes planos, e os filmes *casting* são produzidos com extrusoras mono rosca e dupla roscas. O filme tubular é produzido quase exclusivamente em extrusoras mono rosca. Algumas são equipadas com garganta de alimentação ranhurada para aumentar a capacidade de produção. Ao invés da extrusão de um filme a partir de uma matriz plana, resfriado em cilindros ou num tanque de água, o extrudado flui através de uma matriz anular formando um balão ou tubo que é puxado acima da matriz na vertical (também pode ser horizontal ou para baixo); com o polímero sendo resfriado por convecção de ar forçado. Ao sair da matriz, o balão pode ser soprado em diferentes diâmetros, permitindo larguras de filmes diferentes produzidas com a mesma matriz. Um anel de ar externo na saída da matriz e, possivelmente, um anel de ar interno, resfriam o balão para solidificar o polímero fundido.

A taxa de resfriamento é determinada pela velocidade do filme, do fluxo de ar e da diferença de temperatura. A estabilidade do balão é crítica para o controle da espessura e a sua uniformidade. Após o resfriamento, o balão é achatado por saias em camada dupla plana. Depois, os rolos puxadores, semelhantes aos utilizados para filmes *casting* e filmes calandrados, puxam o filme desde o topo de uma torre.

Um tratamento central, para modificar a polaridade da superfície do polímero para impressão ou adesão a outro substrato, pode ser incorporado entre os rolos puxadores e a bobinadeira. O produto pode ser cortado nos extremos e bobinado em duas laminas planas, ou, se for filme para embalagem, bobinado como um tubo contínuo. Cortar o filme só em

uma extremidade produzirá um filme com o dobro da largura achatada, o corte em ambas as extremidades irá produzir duas bobinas planas de mesma largura. A Figura 19 mostra um processo de filme tubular em operação. A Figura 20 identifica os diferentes componentes dentro do processo que será discutido em mais detalhes. Seguem-se comparativos entre o filme tubular e o filme *casting*.

O filme *casting* tem:

- Melhores propriedades ópticas: transparência, névoa e brilho;
- Maiores taxas de produção;
- Os filmes são mais rígidos, como resultado de uma cristalização muito rápida;
- Melhor controle de espessura (variação 1 a 2% versus 3 a 4% para o filme tubular)

O filme tubular tem:

- Melhor equilíbrio das propriedades entre a direção da máquina e a direção transversal;
- Uma matriz pode processar muitas larguras diferentes, sem usar correções ou realizar cortes significativos no produto;
- Menor resíduo, sem remoção de refiles das bordas;
- O custo do equipamento é aproximadamente 50% menor do que o de uma linha de filme *casting*.

Para a produção de sacarias o filme tubular pode ser dimensionado de modo que apenas uma soldagem térmica no fundo da sacaria será necessária. As sacarias feitas a partir de um processo de filme *casting* requerem três soldas térmicas, uma de fundo e uma em cada lateral do saco.

As extrusoras utilizadas nas linhas de extrusão de filme tubular ficam bem mais próximas ao piso, quando comparadas com outros processos de extrusão, porque o equipamento de tiragem está acima da extrusora. Com este posicionamento da extrusora no piso se consegue ao redor de 1,5m a mais para o resfriamento. As extrusoras são acopladas em matrizes que vão montadas em carros com rodas, com a entrada da matriz por baixo ou na lateral. Um tubo de conexão liga a extrusora à matriz. Matrizes diferentes podem ser facilmente posicionadas para o centro da torre de filme tubular e conectadas a extrusora para mudar o tamanho do filme tubular ou o material a ser processado. As matrizes de filme tubular são as únicas que podem fazer muitos produtos de tamanhos diferentes com a mesma matriz, sem alterar o seu tamanho.

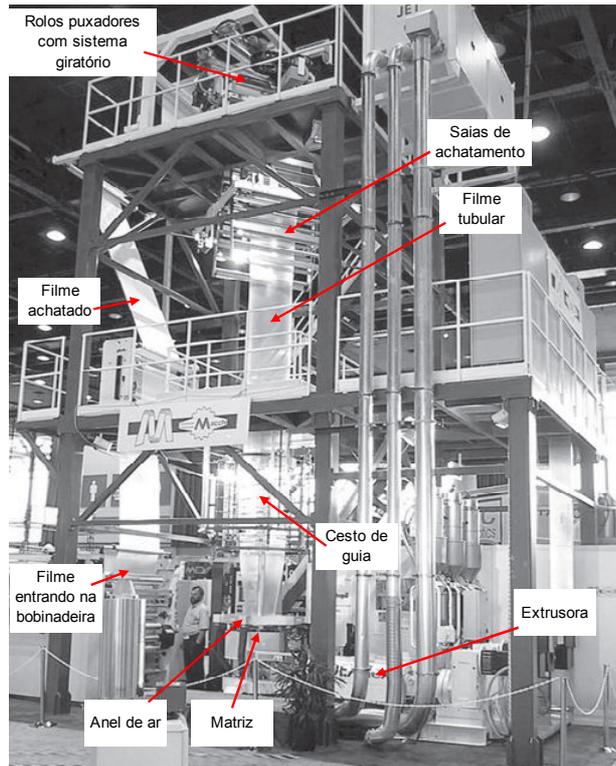


Figura 19. Linha de filme tubular da Maachi Sr.l. [41].

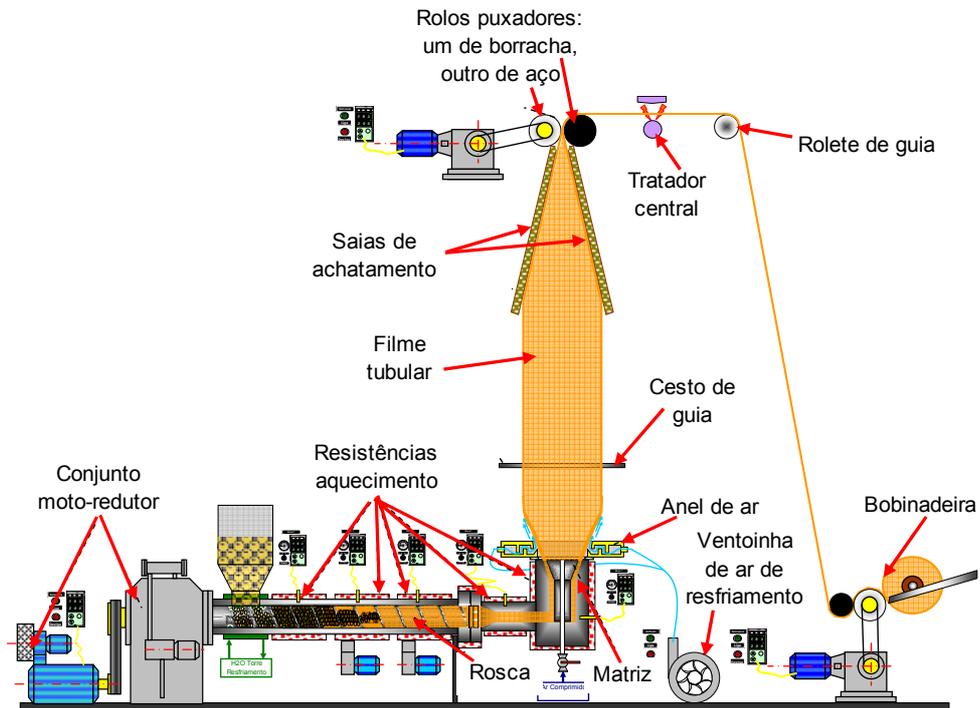


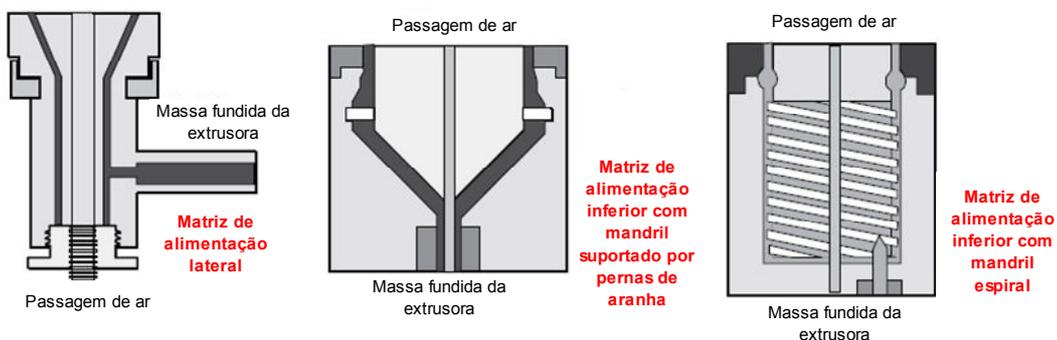
Figura 20. Esquema de um processo de filme tubular com seus principais componentes

## Matrizes

Ao longo dos anos, existiram três tipos de matrizes comumente usadas para produzir filme tubular. As duas primeiras são: a de alimentação inferior com um mandril central suportado por pernas de aranha, que produzem linhas de fluxo difíceis de apagar; e a matriz de alimentação lateral à 90° cujo mandril central também restringe o fluxo de material fundido produzindo linhas de solda. Estas no decorrer do tempo foram substituídas pela matriz de alimentação inferior com um mandril em espiral, que fornece a distribuição mais uniforme da resina e elimina as linhas de solda causadas pelas pernas de aranha de suporte do mandril. Considerado o estado da arte, a partir de 2006, estão se aplicando as matrizes de alimentação lateral, com distribuidor circular, também conhecidas como de distribuidor espiral ou distribuidor de helicóide radial [48]. Os distribuidores planos radiais são caracterizados por um fluxo volumétrico uniforme e, portanto, possuem uma excelente distribuição de espessura, bem como ausência de linhas de solda e outros pontos fracos. Ar passa através de um orifício central na matriz permitindo o sopro do balão, que também pode ser utilizado para o resfriamento interno do mesmo.

Embora a tecnologia de matrizes tenha avançado consideravelmente, suas exigências mantiveram-se constantes. Um projeto para produzir uma boa matriz deve cumprir com os seguintes objetivos:

- Produção de espessura uniforme;
- Que seja simplificado para um fluxo uniforme da resina sem pontos mortos onde a degradação do polímero pode ocorrer;
- Minimizar o tempo de residência;
- Otimizar as taxas de cisalhamento;
- Ter um projeto robusto que suporte os rigores da produção no dia-a-dia operacional.

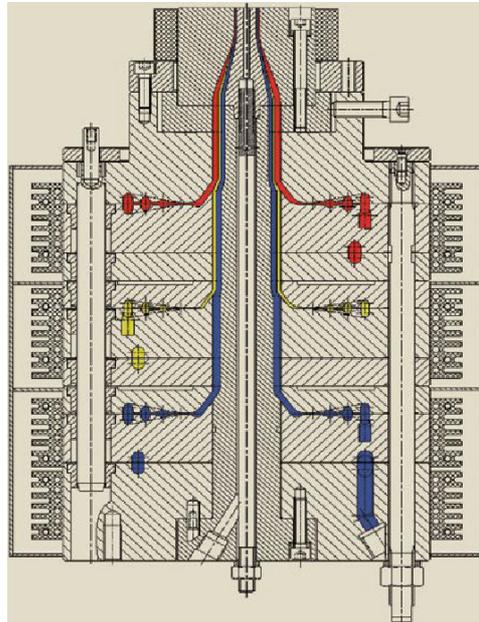


**Figura 21.** Esquema de três tipos de matriz mais usuais para filmes tubulares [41].

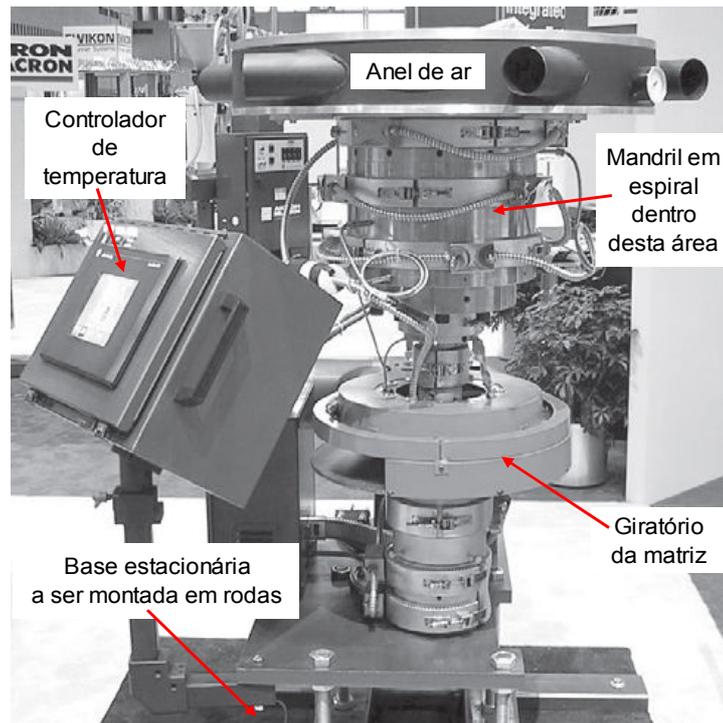
Os desenhos das três matrizes mais tradicionais são mostrados na Figura 21. Na Figura 22 se apresenta o mais novo conceito de matriz com helicóide radial. Alguns modelos

de matriz usam pernas de aranha para suportar os mandris no centro da matriz. Estas pernas de aranha perturbam o fluxo do polímero fundido através da matriz, causando linhas de solda. As linhas de solda podem causar pontos de menor resistência. Para minimizar este efeito é necessário projetar um maior tempo de residência e a suficiente temperatura do polímero na matriz depois que o mesmo polímero se recombina, permitindo o re-arranjo molecular do fundido. A matriz espiral mostrada na Figura 21 tem o fluxo por canais em torno do mandril, com superfícies bem estreitas entre os dois. O polímero entra por baixo, passa através do canal e também sobre a superfície para alcançar a saída da matriz.

Todas as matrizes devem ser projetadas com robustez suficiente para suportar os requisitos operacionais e mecânicos mais um fator de segurança para eventos inesperados do ciclo de vida. O projeto tem que prever uma superfície suave de fluxo com nenhum espaço morto ou áreas estagnadas onde tempos de residência do polímero podem ser excessivos, causando degradação; prever as pressões geradas pelo fluxo de polímero; a expansão térmica; o aquecimento uniforme em todas as regiões da matriz; e, acima de tudo, tem de ser prática e fácil de usar pelo pessoal da produção. Matrizes são feitas de aço máquina AISI-4340 ou 4140. As superfícies são cromadas ou niqueladas para otimizar a superfície e proporcionar a suavidade ao fluxo.

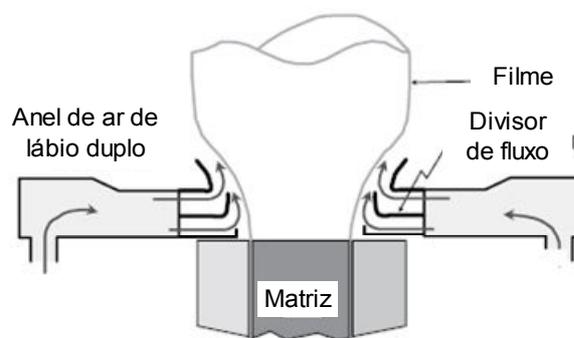


**Figura 22.** Detalhe em corte de uma matriz de co-extrusão para três camadas, com alimentações laterais e distribuidores tipo helicoidais radiais, para filmes tubulares [48].



**Figura 23.** Matriz de filme tubular da *Akron Extruders* [41].

A Figura 23 mostra uma matriz de mandril do tipo espiral da *Akron Extruders*. O anel de ar em cima da matriz serve para resfriar o filme à medida que este flui da matriz. Esta matriz é montada verticalmente com o balão soprado para cima, como mostrado na Figura 24. É cada vez mais comum ter balões soprados para baixo ou horizontalmente. Enquanto o funcionamento interno da matriz não tem que mudar para conseguir isso, a configuração física da matriz tem que ser alterada para acomodar este sopro em outras direções. Para melhorar a uniformidade de bobinagem, a matriz ou os rolos puxadores da torre oscilam de 180 a 360° ou giram continuamente. Isto impede que uma seção fina ou grossa saindo da matriz fique no mesmo local da bobina em toda sua produção. A matriz rotativa é mostrada na Figura 23.



**Figura 24.** Anel de ar de lábio duplo [41].

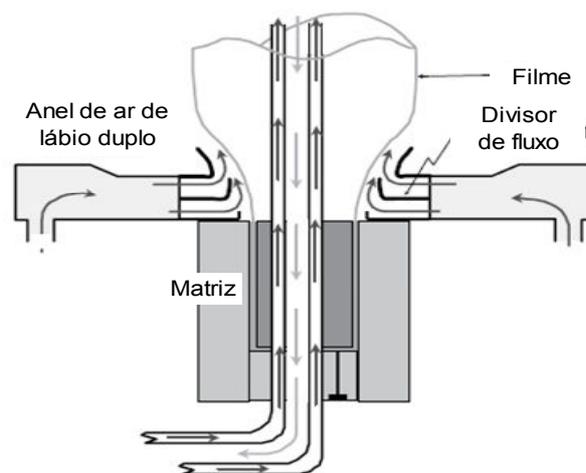
Como a tecnologia avançou e as aplicações tornaram-se mais exigentes, os filmes tubulares mudaram a partir de uma única camada para múltiplas camadas, utilizando coextrusão. A complexidade da matriz aumenta com a adição de outros polímeros, camadas de filme, e mais extrusoras. Dez camadas de filmes podem ser produzidas através da tecnologia de matrizes de coextrusão com filmes tubulares.

## Resfriamento

As duas formas do balão ser resfriado são:

- resfriamento externo com um anel de ar;
- tubo interno de resfriamento (IBC), combinado com um anel de ar externo.

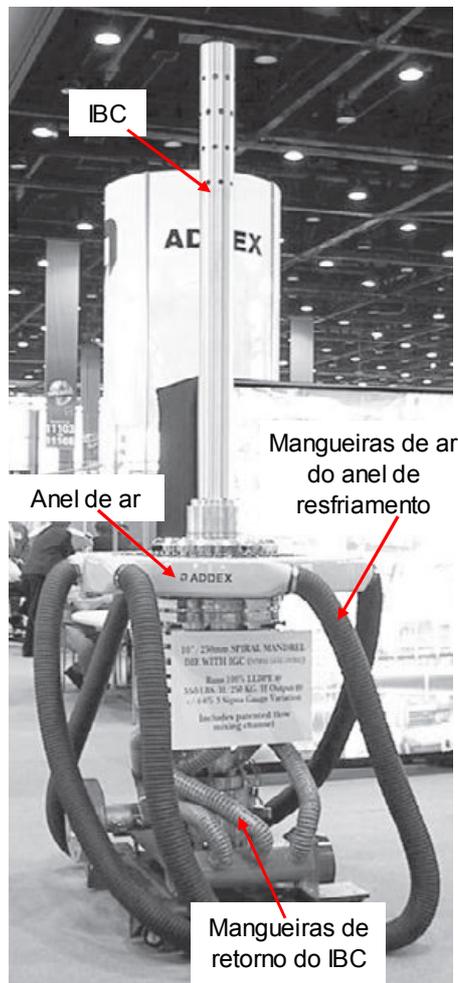
A Figura 24 mostra o anel de ar em cima da matriz. Polímeros semicristalinos, tais como PP, PEAD e PEBD, fluindo da matriz no estado amorfo são claros e transparentes. À medida que o filme resfria, ele começa a cristalizar, tornando-se translúcido, nebuloso, ou opaco. O ponto onde a opacidade começa é a chamada "linha de névoa." Antes da linha de névoa, o fundido pode ser deformado. Depois da solidificação, isto é muito mais difícil e requer de mais energia para deformar o filme. A altura da linha de névoa é controlada pelo fluxo de ar, velocidade do filme, e pela diferença de temperatura. Desses fatores, o mais importante é a velocidade do ar e a forma como ele incide sobre o balão. O anel de ar é especificado com base na capacidade de resfriamento, na estabilidade do balão, e na uniformidade do fluxo de ar. Anéis de ar estão disponíveis com lábio simples ou lábios duplos. A Figura 24 mostra um anel de ar de lábios duplos.



**Figura 25.** IBC – Tubo interno de resfriamento [41].

O IBC mais o anel de ar resfriam o filme em ambos os lados. Esse resfriamento adicional permite velocidades mais altas da linha. Além disso, pelo melhor resfriamento, o

IBC oferece melhor estabilidade do balão. Isto permite velocidades mais elevadas de ar no anel de resfriamento sem influenciar na estabilidade do balão. A Figura 25 mostra como o ar frio é dirigido para o interior do balão e o ar quente é removido. Sem o IBC, o ar é inicialmente insuflado para expandir o balão, uma vez que o balão está no tamanho correto e o filme passa através dos rolos puxadores fechados, nenhum ar mais é adicionado ao sistema ou o diâmetro do balão mudará. Mudanças no diâmetro do balão afetam a largura e a espessura do filme. O IBC reduz a temperatura do ar interno do balão, e mantém o diâmetro do mesmo controlando a entrada de ar frio e a saída de ar quente. Muitas opções estão disponíveis para o IBC, projetos patenteados de vários fornecedores. O ar frio é dirigido para o interior do balão, na base do o filme que flui da matriz e ao longo da superfície interna do balão formado. O ar quente sobe no interior do balão e é retirado através do tubo central. A Figura 26 mostra uma matriz de filme tubular de mandril espiral da Addex Inc. com um anel de ar externo e IBC.



**Figura 26.** IBC – Matriz de filme tubular da *Addex Inc* com anel de ar e IBC [41].

A Brampton Engineering Inc. tem um *4 + 1 Pancake IBC*, sistema que oferece uma melhor eficiência de resfriamento. Tem cinco placas com orifícios ajustáveis, e cada uma pode entregar um diferente fluxo de ar. Com esta flexibilidade do processo, a unidade é usada para processar muitas resinas em uma única ou múltiplas camadas de filmes. O soprador regula o fluxo de ar para o balão através da velocidade do motor. Um menor fluxo de ar deve ser fornecido para a região inferior do balão, na qual o filme fundido tem a mais baixa resistência. O fluxo de ar é gradualmente acrescido nas placas superiores para prover a transferência de calor e o melhor resfriamento. Um regulador de fluxo de ar da placa fornece uma maior troca de ar em geral, proporcionando fluxo de ar com perfil individual a cada placa. O sistema controla precisamente a troca de ar para proporcionar excelente estabilidade do balão. A Figura 27 mostra uma imagem de um *4 + 1 Pancake IBC*.



**Figura 27.** Brampton Engineering Inc., pancake IBC [41].

### **Torre de filme tubular**

A torre de filme tubular suporta:

- Os rolos puxadores de fechamento;
- As saias de achatamento;
- Sistema giratório (se utilizado);
- Cesto estabilizador.

Ela fornece a distância necessária para resfriar e solidificar o filme à ser processado numa determinada taxa de transferência. A torre é rigidamente construída de modo que vibrações não sejam transmitidas através da estrutura para o balão. Vibrações produzem linhas transversais no balão quando o polímero ainda fundido flui da matriz. As saias de achatamento na parte superior do balão podem ser feitas de roletes, sarrafos, madeira ou de metal perfurado. Qualquer que seja a superfície da armação usada, ela deve ser altamente polida e livre de entalhes, rebarbas ou outras imperfeições que podem riscar ou conduzir a defeitos de aparência nos filmes. A armação é ajustável para o diâmetro do balão, permitindo que o ângulo seja alterado com base no diâmetro do balão. Tanto os rolos puxadores de fechamento como as saias de achatamento tem que ser centralizados sobre a matriz para proporcionar puxamento uniforme. Normalmente um rolo de aço e outro revestido de borracha são utilizados para evitar que o ar escape passando do ponto de fechamento e interferindo com a bobinagem. Os rolos puxadores de fechamento devem ser facilmente abertos e fechados a fim de facilitar a operação da linha.

Estabilizadores de balão ou íris são usados para estabilizar o balão. Um cesto no interior da torre impede do balão oscilar muito. Isso ajuda tanto no controle da espessura como da estabilidade do balão.

Se rolos puxadores giratórios são usados, eles podem oscilar 180 ou 360° distribuindo diferenças de espessura do filme em toda largura da bobina. Um motor de velocidade variável controla a taxa de oscilação. Depois de deixar a torre, o filme passa por roletes soltos (loucos) para proporcionar tensão uniforme do filme. Entre os rolos puxadores de fechamento e o bobinador, o filme pode ser cortado de ambos os lados para formar dois filmes separados, fendido de um lado só e aberto para formar um filme grande, ou bobinado como filme tubular para ser usado em sacarias. Entre o corte e a bobinadeira, uma estação de tratamento semelhante ao discutido para o filme *casting* pode ser instalada para modificar a superfície, tornando o filme mais adequado para impressão e a adesão com outros substratos.

## **Bobinador**

Bobinadores de filme tubular são semelhantes aqueles utilizados na produção de filmes *casting*. Ambos, bobinadores de superfície e de centro são utilizados. Bobinas com até 1,5m de diâmetro e 9m de largura são possíveis com velocidades de linha de até 300m/min. A troca automática de bobinas não requer o operador para remover a bobina, bastando manter abastecidos os tubetes de bobinagem.

Um problema no bobinamento tanto do filme tubular como do filme *casting* é controlar o aprisionamento de ar durante a operação de bobinagem. O ar arrastado na fenda

da bobina leva a produção de bobinas telescópicas, ou seja, bobinas não perfiladas adequadamente nas laterais. Bobinadores novos incorporam mecanismos para minimizar o aprisionamento de ar [47].

### **Medição**

A *NDC Infrared Engineering* desenvolveu um medidor rotativo de varredura com sensor gama para determinar a espessura do filme em processos de filme tubular. Este medidor opera sem contato e o filme não é girado ou oscilado. Um quadro contendo o sistema de varredura automática do balão com um sensor gama é montado em torno do filme. O sensor gama se move em torno do balão para medir a espessura do filme. O sensor gira em torno do filme de 0,1 a 1RPM. Medidores estão disponíveis para lidar com balões de diâmetro de 1000mm até 1800 mm.

### **Operação**

A operação de uma linha de filme tubular é semelhante à extrusão de outros processos em que o polímero que flui da extrusora deve ter a temperatura e a pressão do fundido uniforme e adequada. Comparado ao filme *casting*, o filme tubular é geralmente produzido em temperaturas mais baixas do fundido com resinas de mais baixos índices de fluidez. Fatores que afetam a estabilidade do processo são:

- O resfriamento do balão;
- Estabilidade do balão;
- Altura da linha de névoa;
- O fluxo de ar;
- A temperatura do ar de resfriamento;
- Dimensionamento adequado do cesto de calibragem ao balão;
- Saias de achatamento em ângulo adequado;
- Controle de tensão do filme;
- Bobinador.

A produção é controlada por:

- Altura da torre;
- Temperatura de fusão da resina;
- Capacidade da extrusora.

Para a posta em marcha da linha, o fundido que flui da matriz é soldado a um filme de partida que é passado pelo trajeto e paira sobre a matriz. À medida que o extrudado é retirado da matriz, é soldado ao filme de partida e puxado através do sistema em uma taxa lenta. Uma vez que o novo filme passa do topo da torre, os rolos puxadores são fechados e

o filme continua até o bobinador. Ar é utilizado para expandir o balão até o diâmetro desejado. As velocidades da rosca extrusora, dos rolos puxadores, e do bobinador são aumentadas para fornecer a produção e os dimensionais desejados ao filme. Os dois processos de filme soprado são os de baixa linha de névoa, para PEBD e PEBDL, e de alta linha de névoa, para PEAD. No processo convencional, o balão é soprado para seu diâmetro desejado quase imediatamente após a saída da matriz, e a altura da linha de névoa fica próxima da face da matriz. No processo de haste elevada, o diâmetro do balão ao sair da matriz continua a ser do mesmo tamanho que o diâmetro da matriz até muito acima da saída da matriz, antes de ser soprado para o diâmetro do balão desejado.

A razão de sopro (RS) é definida como sendo a razão entre o diâmetro do balão e o diâmetro da matriz [32, 35, 37].

$$RS = D / d \quad (2)$$

Onde:

$D$  = diâmetro do balão (mm);

$d$  = diâmetro da matriz (mm).

De uma forma geral, a razão de sopro utilizada para filmes de PEBD situa-se entre 1,5:1 e 2,5:1 e para PEAD situa-se entre 3,5:1 e 5,5:1, limites dentro dos quais são obtidos filmes com bom balanceamento da orientação molecular nos dois sentidos. A razão de estiramento longitudinal (RE) é a razão entre as velocidades dos rolos puxadores e de escoamento do polímero ao sair da matriz. Esta razão define o estiramento do filme no sentido da máquina. [32, 35, 37]

$$RE = v_t / v_e \quad (3)$$

Onde:

$v_t$  = velocidade de tiragem do filme pelos rolos puxadores (m/min);

$v_e$  = velocidade de escoamento do polímero na saída da matriz (m/min)

Um terceiro parâmetro, que quantifica a relação proporcional entre os estiramentos transversal e longitudinal, é a razão de conformação [32, 35, 37].

$$RC = RS / RE \quad (4)$$

Se  $RC = 1$  – balanceamento perfeito entre estiramentos transversal e longitudinal;

Se  $RC > 1$  – estiramento maior no sentido transversal do que no longitudinal;

Se  $RC < 1$  – estiramento maior no sentido longitudinal do que no transversal

Durante o processamento, as macromoléculas dos termoplásticos amorfos ou semicristalinos tendem a ser orientadas preferencialmente na direção em que sofrem algum

esforço. Com a solidificação do extrudado, a orientação molecular se mantém, embora haja certo grau de relaxação molecular. Na direção da orientação preferencial, o produto apresenta uma maior resistência à tração. Em contrapartida, na direção transversal à preferencial, a resistência à tração é muito inferior. Além disto, a resistência ao impacto também fica muito baixa. Assim, para muitos produtos (incluindo-se os de interesse deste estudo), o processo não deve causar excessiva orientação numa única direção. Por exemplo, para que um filme extrudado tenha boa resistência ao impacto é fundamental que além da orientação na direção longitudinal haja igual orientação na direção transversal. Esta situação é chamada de bi-orientação molecular.

Os polímeros tendem a ter suas macromoléculas fortemente orientadas na direção da extrusão. Um filme produzido pelo processo de extrusão plana se orienta preferencialmente no sentido da máquina e não possui boa resistência ao impacto. Pelo processo de extrusão tubular é possível orientar o filme nos dois sentidos (bi-orientação molecular), através do estiramento transversal à direção de extrusão, provocado pela expansão do diâmetro do balão.

Um dos parâmetros mais críticos que afetam as propriedades do filme são as tensões de tração impostas nas direções, longitudinal e transversal, do material que está sendo extrudado. Enquanto que as tensões de cisalhamento originadas durante a passagem do polímero pela matriz estão sendo aliviadas após a saída do material pela matriz, tensões de elongação bi-axiais são agora desenvolvidas. Para polímeros semicristalinos, o processo de recristalização ocorre abaixo da linha de névoa, e a tensão biaxial imposta na região da linha de névoa exerce uma enorme influência na formação da morfologia do filme. Estas tensões de tração nas direções longitudinal e transversal de filmes tubulares são calculadas em função de medidas de tensão e da pressão interna do balão utilizando-se as seguintes expressões [49]:

$$S_{mf} = Fz (2\pi rs) - \xi - RE \quad (5)$$

$$S_{tf} = r(s) - \xi - \Delta p (RS)^2 RE \quad (6)$$

Onde:

$S_{mf}$  = Tração na direção da máquina na linha de névoa;

$S_{tf}$  = Tração na direção transversal na linha de névoa;

$Fz$  = Força de tração na região da linha de névoa;

$r$  = raio da matriz;

$s$  = abertura da matriz;

$\xi$  = taxa máxima de estiramento;

$RE$  = Razão de estiramento longitudinal;

$\Delta p$  = Pressão interna ao balão;

$RS$  = Razão de sopro.

Pode ser notado que as tensões de tração longitudinal e transversal não são apenas funções das razões de sopro e de estiramento longitudinal, mas também do diâmetro e da abertura da matriz. Desta forma, identificar amostras de filmes apenas com a razão de estiramento longitudinal e razão de sopro não é suficiente; é necessário especificar outras variáveis também, tais como diâmetro e abertura da matriz, taxa de extrusão e temperatura da massa fundida.

A medida em que a velocidade de rotação da rosca aumenta, aumenta também a taxa de cisalhamento (deformação por unidade de tempo), o que resulta em um aumento na temperatura da massa fundida que emerge pela matriz. Também, com o aumento da velocidade de rotação da rosca, aumenta a taxa de extrusão, o que contribui para um aumento da espessura do filme, desde que a velocidade dos rolos puxadores seja mantida constante. Como o filme está mais quente e apresenta maior espessura, isto representa uma maior massa térmica, ocorrendo um atraso na solidificação e conseqüente aumento na linha de solidificação e linha de névoa, desde que as condições de resfriamento sejam mantidas constantes. Assim, como conseqüência do aumento da velocidade da rosca e do efeito dos demais fatores, o diâmetro do balão tende a aumentar, aumentando, portanto, a largura do filme. Isto ocorre, pois como a altura da linha de névoa é aumentada ocorre um alongamento do pescoço, e o volume de ar dentro do balão, por ser constante, provoca um aumento no diâmetro do mesmo.

Um aumento na taxa de resfriamento, seja em função do aumento da velocidade do ar ou pela redução da temperatura do ar de resfriamento, provoca uma diminuição da altura da linha de névoa. Como o volume de ar dentro do balão é constante, e a diminuição da altura da linha de névoa provoca uma diminuição da altura do pescoço e conseqüentemente redução do diâmetro do balão. Como resultado da redução do diâmetro do balão, ocorre um menor grau de estiramento transversal do filme, resultando em aumento em sua espessura.

O aumento do volume interno do balão primeiramente faz com que ocorra um maior estiramento na direção transversal, provocando um aumento em seu diâmetro e a produção de um filme mais fino. Como o filme fica mais fino, ocorre uma diminuição da massa térmica, ou seja, o material resfria mais rapidamente, diminuindo a altura da linha de névoa e linha de solidificação, reduzindo o nível de estiramento longitudinal do filme.

Aumentando-se a velocidade de rotação dos rolos puxadores e mantendo-se constante a taxa de extrusão (velocidade da rosca), ocorre um maior nível de estiramento

longitudinal do filme, tornando-o mais fino. Também, com o aumento da velocidade de rotação dos rolos puxadores, ocorre um aumento na velocidade do filme, de forma que a altura da linha de névoa é aumentada juntamente com a altura do pescoço. Uma vez que o volume de ar dentro do balão é fixo e a altura do pescoço é aumentada, o diâmetro do balão tende a aumentar, aumentando-se também o estiramento na seção transversal do filme. A Tabela 4 resume a relação existente entre as quatro variáveis de processo e três parâmetros da geometria do filme tubular.

As principais vantagens e desvantagens do filme tubular comparado ao filme *casting* estão resumidas abaixo:

- O filme *casting* tem melhores propriedades ópticas.
- As linhas de filme *casting* são mais caras.
- O filme *casting* tem melhor uniformidade de espessura.
- O filme *casting* pode ser produzido em maiores taxas de produção.
- O filme tubular pode produzir uma gama de tamanhos de filme a partir da mesma matriz.
- O filme tubular permite um melhor equilíbrio das propriedades nas direções da máquina e transversal.
- No filme tubular são necessárias torres de grandes alturas verticais.
- Sacarias produzidas com filme tubular não requerem soldagens laterais.

**Tabela 4.** Relação entre variáveis de processo e parâmetros geométricos de filmes tubulares [40].

Parâmetro do Processo	Espessura do filme	Diâmetro do balão	Altura da linha de névoa
Aumento da temperatura da massa polimérica	↓	↑	↑
Aumento da taxa de resfriamento	↑	↓	↓
Aumento da razão de sopro	↓	↑	↓
Aumento da razão de estiramento longitudinal	↓	↑	↑

### **3. OBJETIVO**

#### **Objetivo Geral**

Estudo da influência da razão de sopro na estrutura e propriedades de filmes de polietilenos de alto e baixo grau de cristalinidade produzidos pelo processo de extrusão tubular, e com isto ampliar a gama de aplicações de acordo às propriedades dos filmes e composição (blendas) das poliolefinas usadas.

#### **Objetivos Específicos**

Dois objetivos específicos norteiam o desenvolvimento deste trabalho, buscando sempre atingir o objetivo geral mencionado:

- Disseminar a influência das diferentes razões de sopro nas propriedades térmicas, mecânicas e físicas dos filmes tubulares;
- Disseminar a influência das diferentes composições da blenda de PEBD e PEAD nas propriedades térmicas, mecânicas e físicas dos filmes tubulares;

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

#### Polietileno de Baixa Densidade - PEBD

(Fonte: BRASKEM - Folha de Dados Revisão 3 (Março/09))

Propriedades de controle:

TX 7003	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de fluidez (190°C/2,16kg)	D 1238	g/10 min	0,27
Densidade	D 792	g/cm <sup>3</sup>	0,922

#### Polietileno de Alta Densidade - PEAD

(Fonte: BRASKEM - Folha de Dados Revisão 2 (Maio/10))

Propriedades de controle:

HF 0144	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de fluidez (190°C/5kg)	D 1238	g/10 min	0,58
Índice de fluidez (190°C/21,6kg)	D 1238	g/10 min	12
Densidade	D 792	g/cm <sup>3</sup>	0,944

### 4.2. Metodologia

O processamento dos filmes foi realizado numa linha de extrusão marca Carnevalli, modelo B700, Série B, ano 1985, ilustrada na Figura 28, e composta de:

- moto-reductor principal: 25 KW, corrente contínua, ajuste com conversor de freqüência;
- rosca universal de 40 mm de diâmetro, L/D 30:1, velocidade máxima de 70 rpm;
- 3 zonas de aquecimento na extrusora, 1 zona de aquecimento na conexão à matriz, 1 zona de aquecimento geral para o cabeçote/matriz;
- matriz: diâmetro de 80 mm, abertura dos lábios (*gap*) de 0,8 mm, com sistema giratório (não utilizado);
- torre de altura variável, com saias de fechamento e saias sanfonadoras em madeira, e íris de alumínio de sustentação do balão;
- carro-puxador com um cilindro de aço cromado e outro emborrachado, diâmetro de 80 mm e largura de 600 mm, acionamento por moto-reductor de corrente alternada, 1,5 KW, ajuste com inversor de freqüência;
- bobinadeira dupla sobreposta, com conjuntos de pré-arraste, acionamento por moto-reductor de corrente alternada, 1,5 KW, ajuste com inversor de freqüência;

- resfriamento do filme com anel de ar de alumínio fundido, de lábio simples, com redutor de saída;
- ar de resfriamento proveniente de ventoinha de velocidade fixa, com ajuste de vazão do ar efetuada por íris posicionada na sucção, acionamento de motor de corrente alternada de 1,5 KW.



**Figura 28.** Linha de extrusão utilizada no estudo: marca Carnevalli, modelo B700, Série B, ano 1985.

O processamento dos filmes foi programado para condições, as mais similares possíveis, objetivando evidenciar características das distintas formulações e razões de sopro. Priorizaram-se os padrões de estabilidade e aparência dos filmes, conjugados com o objetivo da obtenção dos dimensionais projetados. Entretanto, durante o processamento ocorreram alterações em ajustes da altura da linha de névoa e de velocidade de tiragem, necessárias para adequação às condições do equipamento e da rotina de processamento. Ou seja, constatou-se que a matriz não possibilita uma distribuição de espessura satisfatória em todo perímetro anular. Além disso, vazões diferentes ajustadas no anel de ar de resfriamento ampliaram ainda mais este problema. Os filmes processados foram identificados como demonstrado na Tabela 5.

**Tabela 5.** Composição e simbologia dos filmes tubulares processados com diversas razões de sopro.

Formulação (PEBD/PEAD)	Consumo (kg)		Razão de sopro (diâm. balão/diâm. matriz)	Simbologia
	PEBD	PEAD		
100 / 0	55	0	1,5:1	1A
			2,5:1	1B
			3,5:1	1C
75 / 25	20	7	1,5:1	2A
			2,5:1	2B
			3,5:1	2C
50 / 50	13	13	1,5:1	3A
			2,5:1	3B
			3,5:1	3C
25 / 75	3	8	1,5:1	4A
			2,5:1	4B
			3,5:1	4C
0 / 100	0	11	1,5:1	5A
			2,5:1	5B
			3,5:1	5C

Como rotina operacional adotou-se:

- Medição de espessura do filme em uma das extremidades (na descida da torre para a bobinadeira), sempre no mesmo ponto.
- Produção fixa da extrusora, com rotação de 70rpm.
- Perfil constante de temperaturas da extrusora e do cabeçote/matriz.
- Alterada a altura da linha de névoa de acordo com a matéria-prima.
- Alterada a velocidade de tiragem para adequação a 60 $\mu$ m de espessura por parede do filme.
- As misturas dos polímeros (blendas) foram realizadas de forma mecânica, manualmente.

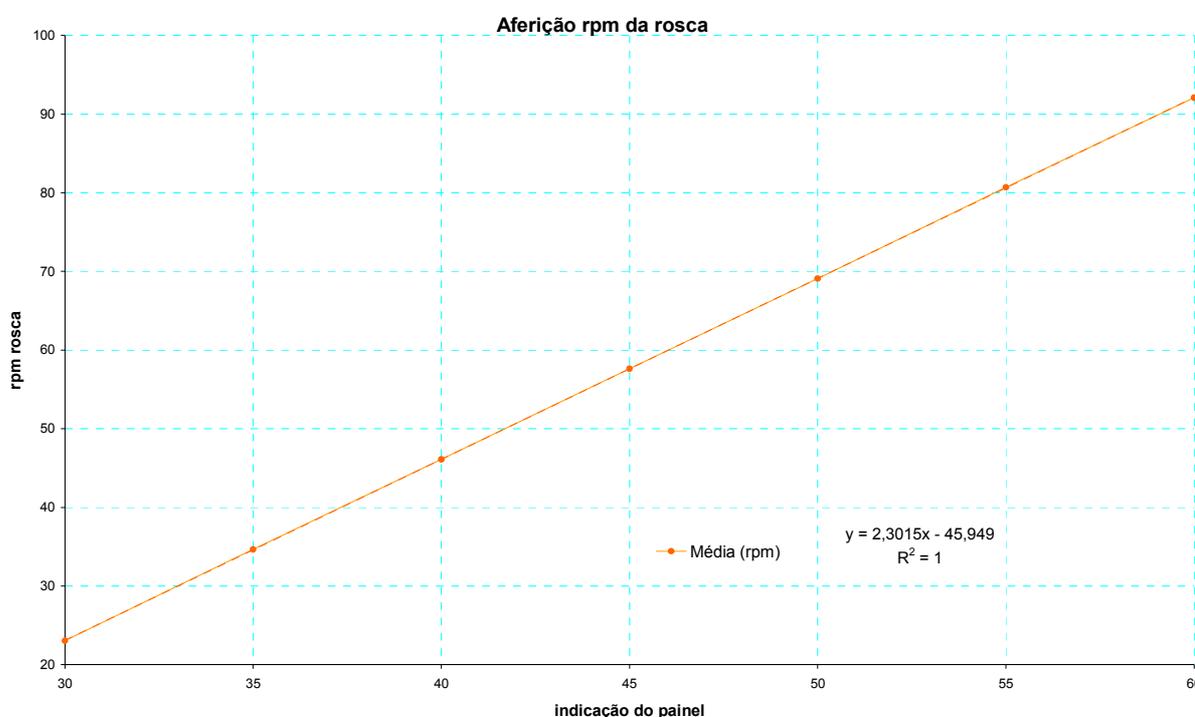
Antes do processamento foi realizada uma análise detalhada da linha de extrusão, constando das etapas de aferição e correlação de leitura de instrumentos, de levantamento de produção da linha de extrusão, e de criação de uma planilha eletrônica de cálculo para estipular os parâmetros iniciais de processamento.

Para a aferição e correlação das leituras de instrumentos com a rotação da rosca em rpm, e com a velocidade de tiragem do filme em m/min, por não haver uma definição de qual a unidade de engenharia é indicada nos instrumentos de leitura da rotação da rosca, e também, da velocidade de tiragem do filme nos rolos puxadores e na bobinadeira, foram

aferidos ditos instrumentos e criada uma tabela de correlação entre a leitura do painel e a unidade de interesse. Foi usado um tacômetro digital portátil a laser, marca Instrutherm, modelo TD - 813, para medir a faixa de rotações, nas extremidades dos eixos da rosca extrusora e dos eixos do rolo puxador e da bobinadeira. Para a rotação da rosca a correlação é direta, da leitura do painel e da rotação real da rosca em rpm. Para a velocidade de tiragem do filme em m/min deve-se multiplicar a rotação real em rpm do rolo puxador e da bobinadeira, pelos seus perímetros, que são os mesmos, de 0,76m. As medições se realizaram, em intervalos adequados, subindo e descendo as rotações, obtendo-se depois as médias que estão registradas nas Tabelas 6, 7 e 8, e em curvas das Figuras 29, 30 e 31. Nesta curvas também estão indicadas as equações das retas, que serviram para cálculos incorporados na planilha eletrônica, e os seus respectivos  $R^2$ .

**Tabela 6.** Correlação da indicação do instrumento do painel com a indicação real da rosca em rpm.

Indicação no painel	Subindo (rpm)	Descendo (rpm)	Média (rpm)
30	21,6	24,5	23,1
35	33,5	35,8	34,7
40	45,2	47,0	46,1
45	56,9	58,4	57,6
50	68,5	69,7	69,1
55	80,4	81,0	80,7
60	92,0	92,2	92,1

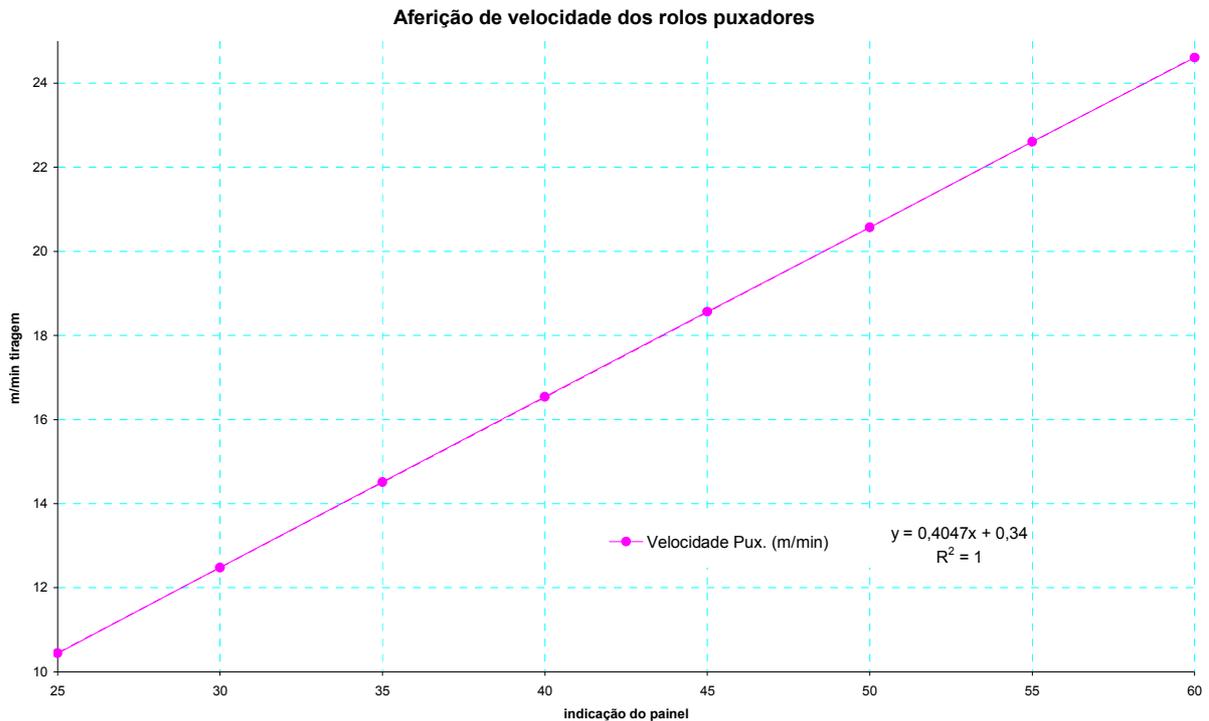


**Figura 29.** Curva de correlação da indicação do instrumento do painel com a rotação real da rosca extrusora em rpm.

**Tabela 7.** Correlação da indicação do instrumento do painel com a velocidade do puxador (m/min).

Indicação do Painel	Subindo (rpm)	Descendo (rpm)	Média (rpm)	Velocidade (m/min)
25	13,8	13,7	13,7	10,4
30	16,4	16,4	16,4	12,5
35	19,0	19,1	19,1	14,5
40	21,7	21,8	21,8	16,5
45	24,3	24,5	24,4	18,6
50	26,9	27,2	27,1	20,6
55	29,6	29,9	29,7	22,6
60	32,3	32,5	32,4	24,6

Obs.: Veloc. (m/min) = Média (rpm) x 0,76m (perímetro do rolo)

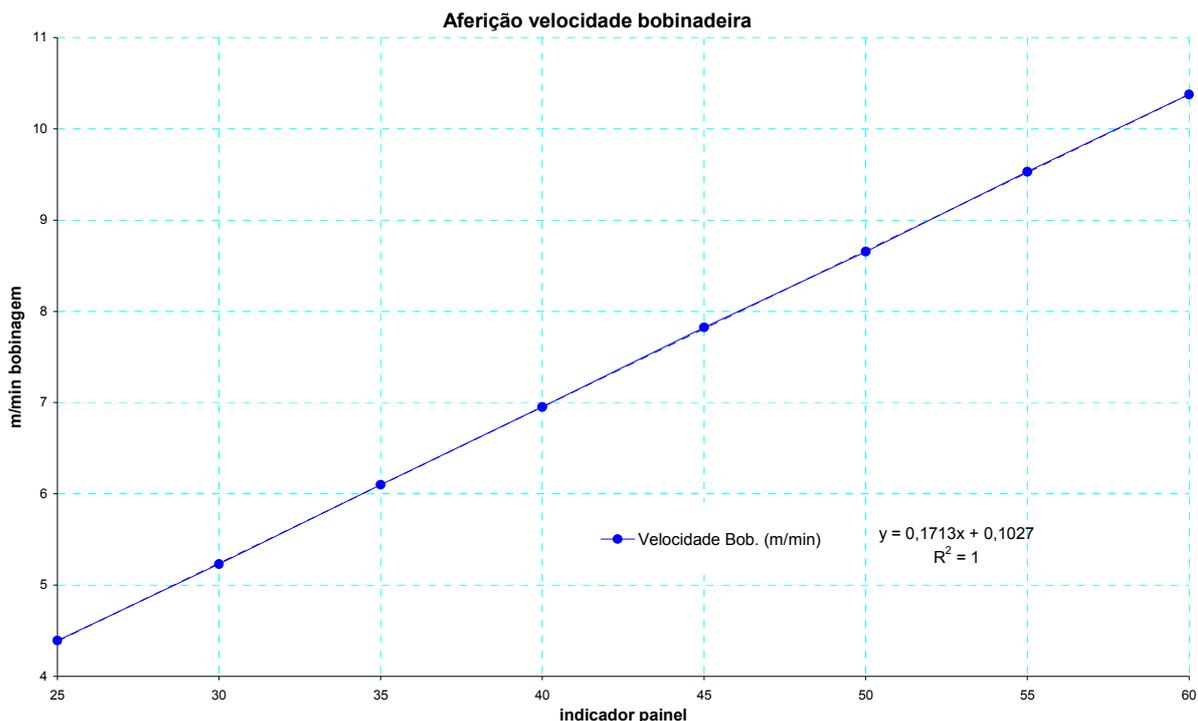


**Figura 30.** Curva de correlação da indicação do instrumento do painel com a velocidade de tiragem real do filme em m/min nos rolos do carro-puxador.

**Tabela 8.** Correlação da indicação do instrumento do painel com a velocidade da bobina. (m/min).

Indicação do Painel	Subindo (rpm)	Descendo (rpm)	Média (rpm)	Velocidade (m/min)
25	5,8	5,8	5,8	4,4
30	6,9	6,9	6,9	5,2
35	8,0	8,1	8,0	6,1
40	9,1	9,2	9,1	6,9
45	10,2	10,3	10,3	7,8
50	11,3	11,4	11,4	8,7
55	12,5	12,6	12,5	9,5
60	13,6	13,7	13,7	10,4

Obs.: Veloc. (m/min) = Média (rpm) x 0,76m (perímetro do eixo)



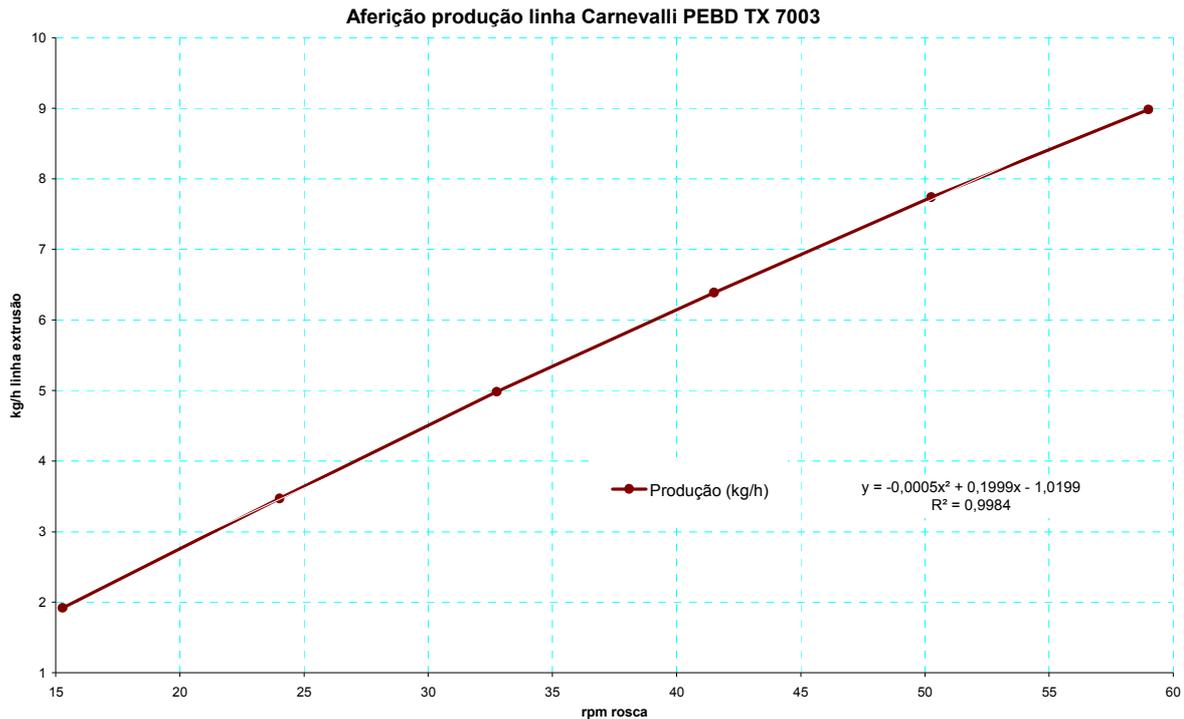
**Figura 31.** Curva de correlação da indicação do instrumento do painel com a velocidade de bobinagem real do filme em m/min na bobinadeira.

Com o PEBD TX 7003, foi efetuado um levantamento de produção da linha de extrusão em toda faixa de rotações da rosca extrusora, sempre em triplicata para cada rotação da rosca. Foram utilizadas uma balança de precisão, marca Marte, modelo AS5500, carga máxima de 5 kg, divisão de 0,01/0,1g, e um cronometro digital, marca Cronóbio, modelo SW-2018, para medição da massa e do tempo. As medições se realizaram, em intervalos adequados, subindo e descendo as rotações da rosca extrusora, obtendo-se depois as médias que estão registradas na Tabela 9 e em curva da Figura 32. Nesta curva também estão indicadas a equação da reta, que serviu para cálculos incorporados na planilha eletrônica, e o seu respectivo  $R^2$ .

**Tabela 9.** Produção da linha de extrusão Carnevalli com PEBD TX 7003.

Rotação rosca (rpm)	Subindo		Descendo		Produção (kg/h)
	(kg)	(seg)	(kg)	(seg)	
15	0,037	68	0,044	83	1,9
24	0,056	59	0,040	43	3,5
33	0,073	51	0,062	45	5,0
42	0,086	47	0,070	39	6,4
50	0,115	52	0,073	33	7,7
59	0,075	32	0,109	41	9,0

Obs.: A produção (kg/h) é a média de medições subindo e descendo corrigidas de segundo para hora



**Figura 32.** Curva de produção da linha de extrusão Carnevalli com PEBD TX 7003.

Mesmo sabendo-se que de acordo com as composições de matérias-primas utilizadas ocorrem variações na produção da linha de extrusão, devido à densidade e a reologia diferenciada de cada composição; por falta de tempo hábil e matéria-prima disponível, e também por considerar-se como um diferencial de produção pequeno para influir de forma decisiva nos valores iniciais de produção, adotou-se sempre a produção do PEBD TX 7003 na criação da planilha eletrônica de cálculo que estipula os parâmetros iniciais de processamento.

Nesta planilha as equações de cálculo automático das indicações dos instrumentos do painel correlacionados para a rotação da rosca, velocidade do carro-puxador e velocidade da bobinadeira são obtidas das equações das retas fornecidas nas respectivas curvas das Figuras 29, 30 e 31.

Para o cálculo da densidade da blenda se utilizam as densidades dos polímeros no estado sólido que constam nas especificações técnicas de produto. A densidade é a do estado sólido do polímero devido a que a produção de uma linha de extrusão depende principalmente da capacidade da vazão de arraste do polímero sólido na zona de alimentação da extrusora. A expressão para a densidade da blenda é,

$$\rho_{blenda} = (\%_{PEBD} + \%_{PEAD}) / [(\%_{PEBD} / \rho_{PEBD}) + (\%_{PEAD} / \rho_{PEAD})] \quad (9)$$

Onde:

$\rho_{blenda}$  = densidade da blenda (kg/m<sup>3</sup>);

$\%_{PEBD}$  = percentual mássico do PEBD na blenda (%);

$\%_{PEAD}$  = percentual mássico do PEAD na blenda (%);

$\rho_{PEBD}$  = densidade do PEBD (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{PEAD}$  = densidade do PEAD (kg/m<sup>3</sup>).

Para o cálculo da velocidade de tiragem do filme a expressão é,

$$v_{tir} = Q_{pro} / (2l \times e \times \rho_{blenda} \times 60) \quad (10)$$

Onde:

$v_{tir}$  = velocidade de tiragem do filme (m/min);

$Q_{pro}$  = produção da linha de extrusão (kg/h);

$2l$  = duas vezes a largura do filme tubular, ou seja, o perímetro do filme (m);

$e$  = espessura da parede do filme (m);

$\rho_{blenda}$  = densidade da blenda (kg/m<sup>3</sup>)

$60$  = transformação de unidade de horas para minutos.

A Tabela 10 exemplifica o cálculo de parâmetros iniciais de processamento para os filmes de PEBD simbolizados como 1A, 1B e 1C correspondentes as razões de sopro 1,5:1; 2,5:1 e 3,5:1, respectivamente.

**Tabela 10.** Exemplo de cálculo dos parâmetros iniciais de processamento para filmes 1A, 1 B e 1C.

células de preenchimento       cálculo automático  
 valores selecionados para uso

(%):       (kg/m<sup>3</sup>):   
 PEAD:         
 PEBD:      

Blenda - dens. (kg/m<sup>3</sup>):       Razão de sopro 1,5:1  
 Espes. parede (µm):       Largura tubular(mm):

Rosca			Tiragem filme			
Indicação Painel	Rotação (rpm)	Produção (kg/h)	Indicação Painel	Bobin. (m/min)	Indicação Painel	Puxador (m/min)
24,3	10	0,9	3,7	0,7	1,0	0,7
28,7	20	2,8	12,3	2,2	4,6	2,2
33,0	30	4,5	20,4	3,6	8,0	3,6
37,3	40	6,2	28,0	4,9	11,3	4,9
41,7	50	7,7	35,2	6,1	14,3	6,1
46,0	60	9,2	41,9	7,3	17,2	7,3
<b>50,4</b>	<b>70</b>	<b>10,5</b>	<b>48,2</b>	<b>8,4</b>	<b>19,8</b>	<b>8,4</b>

Razão de sopro 2,5:1

Largura tubular(mm):

Tiragem filme			
Indicação Painel	Bobin. (m/min)	Indicação Painel	Puxador (m/min)
2,0	0,4	0,3	0,4
7,2	1,3	2,4	1,3
12,1	2,2	4,5	2,2
16,7	3,0	6,5	3,0
21,0	3,7	8,3	3,7
25,1	4,4	10,0	4,4
<b>28,8</b>	<b>5,0</b>	<b>11,6</b>	<b>5,0</b>

Razão de sopro 3,5:1

Largura tubular(mm):

Tiragem filme			
Indicação Painel	Bobin. (m/min)	Indicação Painel	Puxador (m/min)
1,3	0,3	-0,1	0,3
5,0	1,0	1,5	1,0
8,5	1,6	3,0	1,6
11,8	2,1	4,4	2,1
14,9	2,6	5,7	2,6
17,8	3,1	6,9	3,1
<b>20,5</b>	<b>3,6</b>	<b>8,1</b>	<b>3,6</b>

#### 4.2.1. Condições de Processamento

Os parâmetros de processamento de todos os filmes tubulares estão mostrados na Tabela 11.

**Tabela 11.** Dados de processamento dos filmes tubulares.

Razão de Sopro		1,5:1	2,5:1	3,5:1	
Temperaturas (°C)	Extrusora	zona 1	200	200	200
		zona 2	200	200	200
		zona 3	200	200	200
	Conexão	zona 4	200	200	200
	Cabeçote/matriz	200	200	200	
Veloc. da rosca em todos filmes (rpm)		70	70	70	
Velocidade tiragem (m/min)	Filmes 1	6,1	5,0	4,2	
	Filmes 2	7,5	6,1	3,6	
	Filmes 3	8,1	5,0	4,2	
	Filmes 4	7,5	5,3	4,4	
	Filmes 5	8,0	6,5	4,4	

#### 4.2.2. Caracterização

A caracterização das amostras foi realizada, através de ensaios físicos, mecânicos, térmicos, reológicos e morfológicos que são descritos a seguir [76].

##### 4.2.2.1. Ensaios Físicos

###### Largura e Espessura

A largura dos filmes tubulares foi medida junto à bobinadeira, utilizando-se uma trena marca Stanley modelo 30-608, no início, metade e final do processamento.

A medição da espessura dos filmes se realizou na passagem da torre para a bobinadeira, sempre no mesmo lado do filme (lado direito de extrusão – entre os pontos de 12 a 14 de medição dos gráficos de espessura mostrados adiante), de forma contínua, até obter-se o valor desejado de 60µm. Após a produção de todos os filmes foi coletada uma amostra do final do processamento, com identificação dos parafusos de ajuste da matriz (oito parafusos, números 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16 nos gráficos), para medição da distribuição das espessuras no perímetro dos filmes. Foram realizadas 16 medidas. O instrumento de medição utilizado foi um medidor de espessura marca Mitutoyo modelo NO. 7301. A confecção de gráficos tipo radar, da distribuição da espessura no perímetro do filme, foi obtida com planilha eletrônica Microsoft Office Excel 2003. As medições de largura

e de espessura realizaram-se de acordo com as normas ASTM D6988-08 [50] e ABNT NBR 15560-1 [51].

### **Coeficiente de Fricção – COF**

A medição do coeficiente de fricção (COF) dos filmes processados é importante para avaliar, de forma indireta, a rugosidade dos filmes, que influencia sobremaneira em posteriores processos de acabamento e na sua aplicação final [52].

O coeficiente de fricção (COF) é uma força contrária ao movimento do corpo que dificulta seu deslizamento. Existem dois tipos de COF: coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito dinâmico. Para que um corpo entre em movimento a força de atrito estático ( $F_{ate}$ ) deve ser maior que a força  $F$  exercida no corpo na direção contrária. Antes de o corpo entrar em movimento a  $F_{ate}$  é igual à força  $F$ , nesse caso temos medição do COF estático. Após o corpo entrar em movimento a força é igual ao coeficiente de atrito dinâmico, dessa maneira temos o COF dinâmico. Como para dar início ao movimento a força necessária é maior que para manter o movimento o COF estático é sempre maior que o dinâmico [46]. Conhecendo-se a força e o peso e utilizando as fórmulas abaixo determinam-se o COF estático e o dinâmico pelas equações 7 e 8, respectivamente.

$$\mu_e = F_{ate} / P \quad (7)$$

$$\mu_d = F_{atd} / P \quad (8)$$

Onde:

$\mu_e$  = COF estático;

$\mu_d$  = COF dinâmico;

$F_{ate}$  = Força de atrito estático;

$F_{atd}$  = Força de atrito dinâmico;

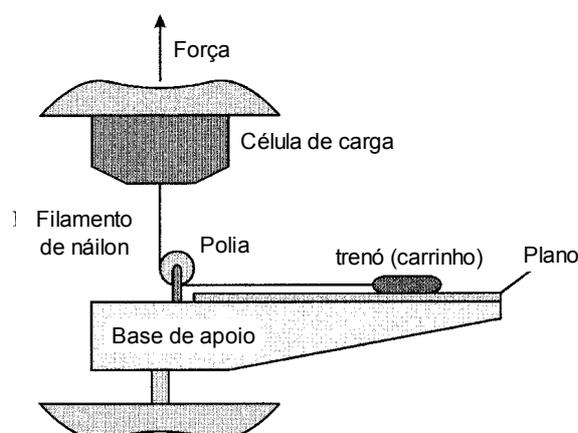
$P$  = Peso

Filmes de PEBD tem maior COF do que filmes de PEAD. Filmes transparentes e brilhantes, geralmente, tem maiores COFs do que filmes opacos. Sob condições de estocagem, as propriedades de deslizamento dos filmes permanecerão inalteradas por um longo período de tempo [53].

A metodologia para caracterização do COF de filmes flexíveis utilizada é baseada na norma ASTM D-1894 [54] e realizada no equipamento TMI (Testing Machines Inc.). O método caracteriza-se pela medida direta da força de resistência ao movimento de um bloco (*sled*) por uma célula de carga calibrada. O software calcula o coeficiente de fricção estático

e dinâmico instantaneamente, à medida que ocorre o movimento. O COF é plotado no gráfico conforme divisão da força medida pelo peso do bloco. Os corpos-de-prova são cortados nas dimensões de 48cm x 14cm para a base e 10cm x 6cm para o *sled* (trenó ou carrinho). O sentido de corte é sempre na DM, ou seja, o maior lado do retângulo deve estar paralelo ao sentido da extrusão. Na Figura 33 se apresenta uma ilustração esquemática da caracterização do COF de filmes.

Previamente à realização do ensaio, as amostras são climatizadas por 40h a temperatura e umidade controlada ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $50 \pm 10\%$  de umidade relativa). Para cada amostra são realizadas três determinações em cada uma das faces do filme a fim de identificar variações que muitas vezes poderiam não ser perceptíveis em apenas um dos lados. Na caracterização de embalagens flexíveis, é comum a determinação do COF de ambos os lados, uma vez que uma das faces pode ter sido submetida a algum tratamento externo (corona, chama, plasma) que acabam modificando a rugosidade superficial do filme e, conseqüentemente, seu coeficiente de atrito. Importante destacar que durante a manipulação do filme devem-se evitar contaminações com pó e gordura da mão, que podem interferir no resultado.



**Figura 33.** Configuração básica do equipamento usado para medir o COF de filmes plásticos [5].

### Índice de Fluidez

Os ensaios de índice de fluidez do fundido (MFI) dos filmes foram realizados no plastômetro CEAST modelo Melt Flow Junior, conforme norma ASTM D1238-10 [55]. Os filmes processados foram picotados adequadamente em lotes de 2,5g. Foram utilizadas as condições de teste de  $190^\circ\text{C}/5\text{ kg}$  e os ensaios foram realizados em triplicata.

#### **4.2.2.2. Ensaios Mecânicos - Ensaio de Tração**

Os filmes foram testados pelo ensaio mecânico de tração utilizando-se uma máquina de tração universal INSTRON modelo 3367, de acordo com a norma ASTM D882 – 09 [49], com filme em posição de orientação na direção da máquina - DM e na direção transversal - DT, com célula de carga de 1kN, e velocidade de ensaio de 500mm/min. Foram ensaiadas de 7 a 12 espécimes para cada amostragem [56].

#### **4.2.2.3. Ensaios Térmicos**

##### **Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC**

As temperaturas e entalpias de fusão e cristalização e o grau de cristalinidade das amostras foram avaliados utilizando-se um calorímetro diferencial exploratório (DSC), marca Perkin Elmer, modelo Pyris 6. As amostras (aproximadamente 5mg) foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera inerte (N<sub>2</sub>), em um intervalo de 20 a 200°C, conforme norma ASTM D3418 – 99 [57]. O percentual de cristalinidade (% X<sub>c</sub>) foi calculado utilizando-se o valor de referência de entalpia de fusão das amostras de PEAD e de PEBD 100% cristalinas, X e Y respectivamente, obtidos na literatura [58]. Já a temperatura de cristalização foi obtida através do pico de cristalização durante o resfriamento da amostra.

##### **Monitoramento da Temperatura do Fundido no Processo**

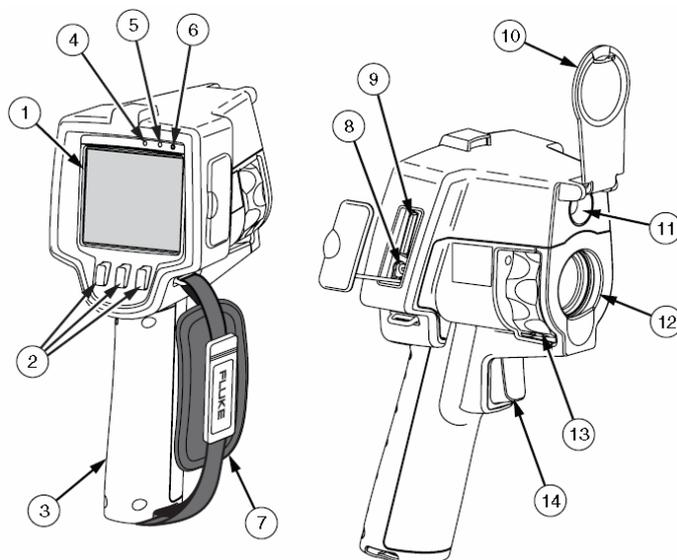
Outro parâmetro avaliado foi o monitoramento da temperatura do polímero fundido, na saída da matriz. O instrumento utilizado foi um pirômetro de tecnologia a infra-vermelho, Raytec Raynger ST.

##### **Termografia**

Outra análise importante foi avaliar a distribuição de temperaturas no filme desde a saída da matriz até após a linha de névoa (na direção da máquina e no perímetro do balão). Para a realização do ensaio foi utilizado um termovisor de marca Fluke modelo Ti10. Esta análise termográfica permite determinar a região da linha de névoa, e desta maneira sua altura, e também correlacionar às distribuições de temperatura e de espessura no perímetro dos filmes tubulares.

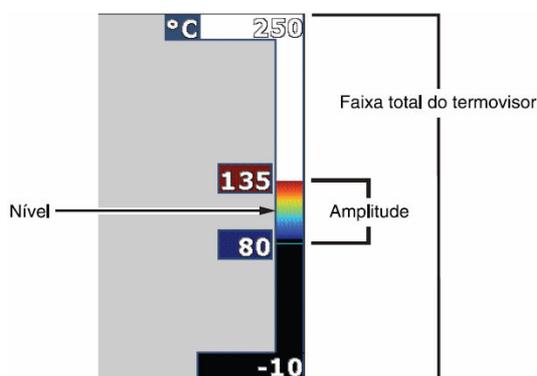
O termovisor Ti10 é uma câmera de mão projetada para capturar imagens para fins de manutenção preditiva, além de verificar, identificar e solucionar problemas de equipamentos. Ele produz imagens visuais e térmicas que são apresentadas em um visor de 640 x 480mm. As imagens térmicas e visuais exibidas no visor de cristal líquido do

termovisor podem ser salvas em um cartão de memória SD. A transferência de imagens para um computador é realizada retirando-se o cartão de memória SD e conectando-o ao computador por meio de um leitor de cartão incluído. O programa SmartView® está incluído para análise e geração de relatórios das imagens salvas. Na Figura 34 é visualizado o instrumento.



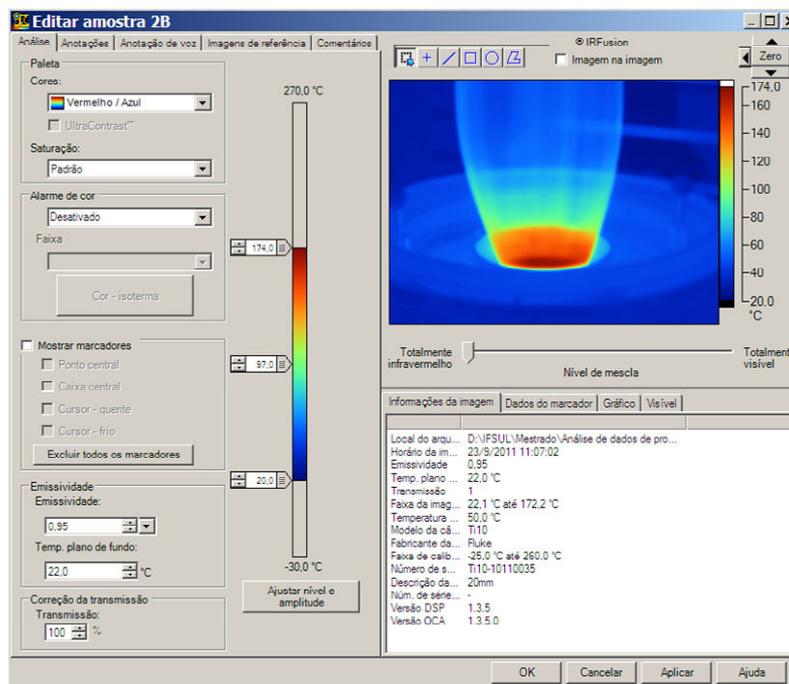
**Figura 34.** Ilustração do termovisor Fluke Ti10. Fonte: manual do instrumento.

As imagens térmicas e visuais podem ser exibidas simultaneamente como imagem térmica total ou como imagens PIP (*Picture-In-Picture*). A faixa de temperatura das imagens térmicas vai de  $-20^{\circ}\text{C}$  até  $+250^{\circ}\text{C}$ . A imagem térmica pode ser exibida em diversas paletas de cores, conforme o modelo do termovisor. O termovisor usa diversas cores ou tons de cinza para exibir o gradiente de temperatura da área do campo de visão. Dois ajustes podem ser feitos para mudar a forma em que as imagens são exibidas no termovisor: paleta e faixa. Na Figura 35 é mostrado um exemplo do ajuste de definição da faixa e amplitude.



**Figura 35.** Exemplo de um ajuste de definição da faixa e amplitude do termovisor Fluke Ti10. Fonte: manual do instrumento.

Na Figura 36 se apresenta um exemplo de tratamento de uma imagem gerada pelo termovisor utilizando-se o programa SmartView®.



**Figura 36.** Exemplo de uma página do programa SmartView® para tratamento de uma imagem gerada pelo termovisor Ti10. Fonte: programa SmartView®.

#### 4.2.2.4. Ensaios Ópticos

##### Microscopia Óptica - MO

A microscopia óptica permite a análise de grandes áreas, além de ser de utilização simples e rápida. Ela possibilita a análise da superfície do material, onde se observam a homogeneidade, tamanho e distribuição de cristalitos, dependentes dos tipos de polímeros e de parâmetros de processamento utilizados. Para a detecção dos cristalitos na superfície dos filmes foi utilizado o microscópio ótico Zeiss modelo Axio Scope A1, de acordo com a norma ASTM E2015 - 04 [59], referenciado pela literatura [60].

##### Ensaios Colorimétricos, Opacidade e Brilho

A análise das propriedades ópticas foi realizada em espectrofotômetro BYK Spectroguide, o ensaio de brilho foi realizado com feixe a 60°, sobre padrão branco com  $L = 95,14$ ;  $a = -1,01$  e  $b = 0,73$  ( $a$ ,  $b$  e  $L$  são os parâmetros do espaço cromático CIELAB e quantificam as mudanças de coloração). O parâmetro “ $a$ ” mostra a variação da coloração da amostra do verde ( $-a$ ) para o vermelho ( $+a$ ); o valor “ $b$ ” está relacionado com as mudanças de coloração

de azul (-b) para amarelo (+b); e o valor “L” representa a luminosidade, sendo que seus valores numéricos variam de preto (0) para branco (100) e padrão preto com brilho de 95,1.

As opacidades dos filmes foram dadas em valores percentuais (%), sendo que o brilho não tem unidade de medida específica, sendo considerado como uB (unidade de Brilho). A análise de brilho foi realizada a 60°. As análises foram baseadas nas normas ASTM D1746 – 03 [61] para a transparência, ASTM D 1003 - 00 para a opacidade [62], e ASTM D 2457 - 97 para o brilho [63].

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Influência do Processamento nas Propriedades Físicas

Na Tabela 12 são apresentados os parâmetros de processamento e os resultados das espessuras do filme nas diferentes razões de sopro da amostra 1 correspondente ao PEBD cujo processamento dos filmes tubulares 1A, 1B e 1C foi realizado no dia 17/06/2011, das 14:15 às 19:30 horas, não se registraram os horários de modificações das razões de sopro.

**Tabela 12.** Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 1A, 1B e 1C.

Data: 17 / 06 / 2011 Hora início: 14:15 Hora final: 19:30

Identificação do filme	1A	1B	1C	
Temperatura da massa (°C) *	198	201	203	
Largura do filme tubular (mm)	190	315	440	
Altura da linha de névoa (mm)	280	320	320	
Velocidade da rosca (rpm)	70	70	70	
Velocidade de tiragem (m/min)	6,1	5,0	4,2	
Espessura filme ( $\mu\text{m}$ )	1	100	50	45
	2	90	50	45
	3	110	55	60
	4	95	55	60
	5	95	60	60
	6	90	60	60
	7	70	55	60
	8	80	70	60
	9	70	70	55
	10	65	70	40
	11	60	65	50
	12	60	65	50
	13	70	60	55
	14	75	55	45
	15	80	60	40
	16	95	60	40
	Média real	82	60	52
Limites de especificação ( $\mu\text{m}$ )	Superior (+ 5%)	86	63	55
	Inferior (-5%)	78	57	49
	Média	=/ > 82	=/ > 60	=/ > 52

\* Temperatura de massa medida com pirômetro Raytek Raynger ST na saída da matriz

O processamento dos filmes tubulares ocorreu nos dias 17/06/2011 e 23/09/2011, descrito no item 4.2, no Laboratório de Transformação, do Campus de Sapucaia do Sul, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense.

Constatou-se que, nas melhores condições de ajuste, não se conseguiu alcançar a especificação para distribuição de espessura conforme as exigências da norma ABNT NBR 15560-1 [51], de espessura média de 60 $\mu$ m e desvio de +/- 5%. Fato que também acontece com os equipamentos em funcionamento nas indústrias de transformação de filmes plásticos, o que promove uma aproximação com a realidade.

No dia 23/09/2011, das 09:00 até às 11:35 horas se processaram os filmes tubulares da blenda de PEBD/PEAD 75/25, das 13:15 às 14:45 horas da blenda de PEBD/PEAD 50/50, das 14:45 às 15:45 horas da blenda PEBD/PEAD 25/75 e das 15:45 às 16:45 horas do PEAD, de forma contínua, e sem realizar ajustes na matriz de conformação. Os resultados das espessuras e larguras dos filmes são reportados nas Tabelas 13 a 16.

**Tabela 13.** Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 2A, 2B e 2C.

Data: 23/09/ 2011		Hora início: 09:00h		Hora final: 11:35h	
<b>Identificação do filme</b>		<b>2A</b>	<b>2B</b>	<b>2C</b>	
Temperatura da massa (°C) *		205	203	206	
Largura do filme tubular (mm)		190	315	440	
Altura da linha de névoa (mm)		180	180	270	
Velocidade da rosca (rpm)		70	70	70	
Velocidade de tiragem (m/min)		7,5	6,1	3,6	
Espessura filme ( $\mu$ m)	1	60	70	70	
	2	60	45	65	
	3	50	50	40	
	4	55	60	65	
	5	60	60	60	
	6	70	70	70	
	7	55	60	85	
	8	60	45	65	
	9	70	50	45	
	10	60	40	40	
	11	85	40	40	
	12	80	30	40	
	13	85	40	50	
	14	75	25	50	
	15	65	30	90	
	16	60	70	90	
		Média real	66	49	60
Limites de especificação ( $\mu$ m)	Superior (+5%)	69	52	63	
	Inferior (-5%)	63	46	057	
	Média	=/> 66	=/> 49	=> 60	

\* Temperatura de massa medida com pirômetro Raytek Raynger ST na saída da matriz.

Os resultados apresentados nas Tabelas 13 a 15 correspondem às blendas de PEBD/PEAD nas proporções percentuais de 75/25, 50/50 e 25/75 respectivamente, onde é possível observar que a altura de linha de névoa do PEBD com 25% de PEAD oscilou de 180 a 270mm (Tabela 13), porém com o aumento do teor de PEAD houve um acréscimo até 500mm. Observa-se também que as espessuras das blendas apresentaram menor variação, porém foram inferiores ao máximo obtido pelo PEBD puro (Tabela 12), encontrando-se no intervalo de 50 a 60 $\mu$ m.

**Tabela 14.** Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 3A, 3B e 3C.

Data: 23/09/2011		Hora início: 13:15h		Hora final: 14:45h	
<b>Identificação do filme</b>		<b>3A</b>	<b>3B</b>	<b>3C</b>	
Temperatura da massa (°C) *		230	220	220	
Largura do filme tubular (mm)		190	315	440	
Altura da linha de névoa (mm)		400	400	400	
Velocidade da rosca (rpm)		70	70	70	
Velocidade de tiragem (m/min)		8,1	5,0	4,2	
Espessura filme ( $\mu$ m)	1	55	80	60	
	2	50	60	60	
	3	40	60	40	
	4	45	45	40	
	5	40	40	50	
	6	60	70	60	
	7	60	90	70	
	8	80	90	75	
	9	90	75	60	
	10	70	65	35	
	11	65	40	25	
	12	85	35	20	
	13	60	40	20	
	14	70	35	40	
	15	60	50	80	
	16	45	85	75	
		Média real	61	60	51
Limites de especificação ( $\mu$ m)	Superior (+5%)	64	63	54	
	Inferior (-5%)	58	57	48	
	Média	=/> 61	=/> 60	=> 51	

\* Temperatura de massa medida com pirômetro Raytek Raynger ST na saída da matriz.

**Tabela 15.** Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 4A, 4B e 4C.

Data: 23/09/2011                      Hora início: 14:45h      Hora final: 15:45h

<b>Identificação do filme</b>		<b>4A</b>	<b>4B</b>	<b>4C</b>
Temperatura da massa (°C)*		215	220	220
Largura do filme tubular (mm)		190	315	440
Altura da linha de névoa (mm)		500	500	400
Velocidade da rosca (rpm)		70	70	70
Velocidade de tiragem (m/min)		7,5	5,3	4,4
Espessura filme ( $\mu\text{m}$ )	1	50	60	60
	2	60	50	50
	3	55	50	50
	4	40	50	45
	5	35	60	40
	6	65	80	70
	7	80	110	90
	8	90	80	80
	9	90	80	45
	10	100	60	30
	11	80	40	20
	12	75	30	15
	13	65	35	20
	14	60	35	35
	15	50	40	70
	16	45	40	55
		Média real	65	56
Limites de especificação ( $\mu\text{m}$ )	Superior (+5%)	69	59	51
	Inferior (-5%)	61	53	45
	Média	=/> 65	=/> 56	=/> 48

\* Temperatura de massa medida com pirômetro Raytek Raynger ST na saída da matriz.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados do processamento do filme PEAD nas três razões de sopro, 1,5:1, 2,5:1 e 3,5:1, onde as espessuras médias dos filmes estiveram entre 48 e 61 $\mu\text{m}$ . Observa-se também que a altura da linha de névoa se manteve constante em 400mm.

**Tabela 16.** Parâmetros e resultados de processamento dos filmes tubulares 5A, 5B e 5C.

Data: 23/09/2011

Hora início: 15:45h

Hora final: 16:45h

Identificação do filme		5A	5B	5C
Temperatura da massa (°C)*		220	220	220
Largura do filme tubular (mm)		190	315	440
Altura da linha de névoa (mm)		400	400	400
Velocidade da rosca (rpm)		70	70	70
Velocidade de tiragem (m/min)		8,0	6,5	4,4
Espessura filme ( $\mu\text{m}$ )	1	85	40	50
	2	85	40	45
	3	85	20	40
	4	55	25	45
	5	40	30	50
	6	60	40	70
	7	50	70	65
	8	45	60	70
	9	50	60	50
	10	35	50	60
	11	35	50	30
	12	50	70	30
	13	60	50	20
	14	75	50	35
	15	80	40	40
	16	80	30	70
	Média real	61	45	48
Limites de especificação ( $\mu\text{m}$ )	Superior (+5%)	64	48	51
	Inferior (-5%)	58	43	45
	Média	=/> 61	=/> 45	=/> 48

\* Temperatura de massa medida com pirômetro Raytek Raynger ST na saída da matriz.

Cabe ressaltar que este equipamento é do ano de 1985, portanto antigo, de forma similar ao que é comum ocorrer nas empresas de transformação existentes no mercado brasileiro. Ele é utilizado semanalmente em aulas práticas dos cursos técnicos e tecnológicos da instituição, com diversos tipos (*grades*) de polietilenos virgens e reciclados, além de também servir para desenvolvimentos e pesquisas. Distintamente dos processamentos industriais que funcionam ininterruptamente durante longos períodos de tempo, este equipamento funciona em curtos períodos do dia, agendados de acordo com as necessidades de ensino, desenvolvimento e pesquisa. Isto faz com que aconteçam seguidas fases de posta em marcha e parada, com conseqüentes aquecimentos e resfriamentos, gerando a possibilidade de degradação e contaminação de materiais, e também a desajustes da distribuição de espessura no perímetro da matriz de conformação.

Para uma melhor visualização da forma dos filmes tubulares das diferentes composições, na saída da matriz, nas Figuras de 37 a 41 são mostradas as imagens durante processamento dos filmes tubulares, com suas correspondentes alturas de linhas de névoa.

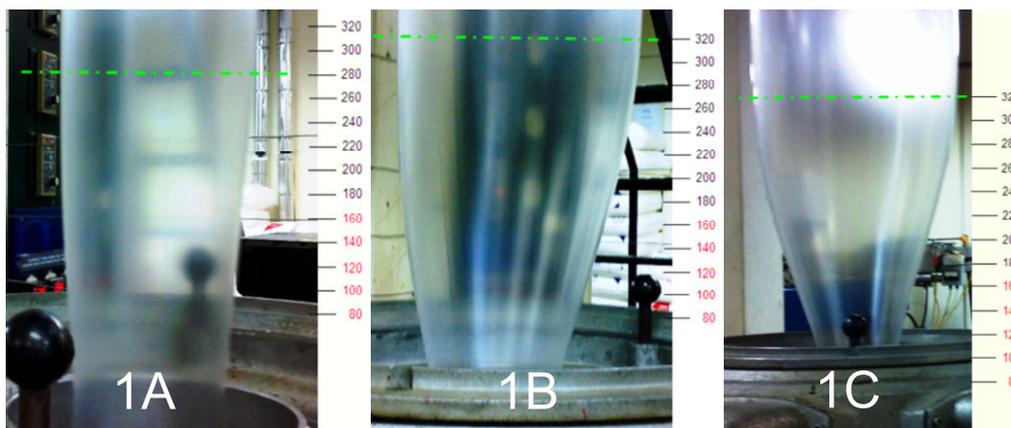
Observa-se a influência da composição da blenda e da razão de sopro na forma e largura dos filmes entre a saída da matriz e o limite da altura da linha de névoa, onde é mais pronunciada a formação de pescoço com o aumento do teor de PEAD. Observa-se também que a presença do PEAD na blenda aumenta a opacidade do filme, tornando-o translúcido, fato esperado, já que este é um polímero altamente cristalino quando comparado ao PEBD.

De acordo com Cantor [35] o PEBD tende a ser relativamente fácil de processar. Comparado a outros tipos de PE, o PEBD funde com uma temperatura relativamente baixa (105 a 115°C) e não necessita de muita potência do motor da extrusora. Filmes de PEBD são de viscosidade moderadamente alta, mas a vasta gama de ramificação produz uma janela de processamento bastante ampla e uma elevada resistência do fundido no balão. Isto torna o balão estável e sendo processado com uma baixa altura da linha de névoa.

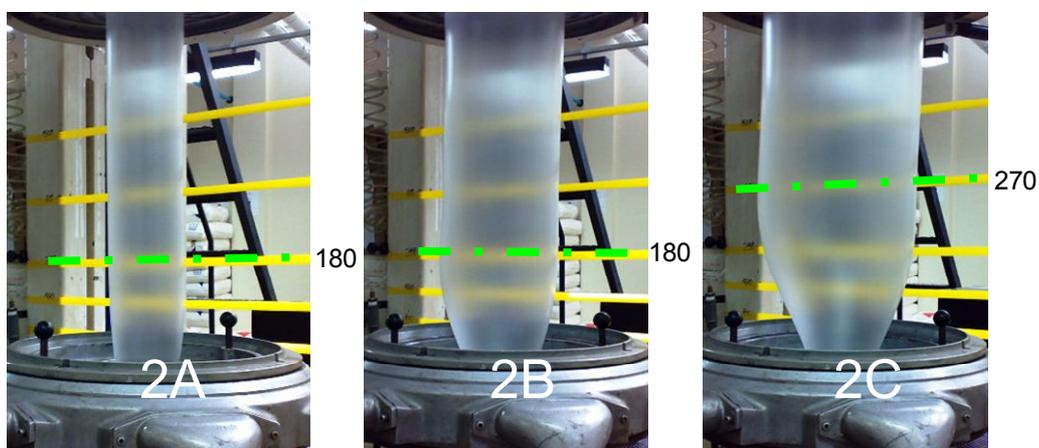
Os filmes de PEBD se caracterizam por sua flexibilidade e resistência. A tenacidade é derivada de uma boa combinação de resistência e alongamento, particularmente quando processado com alta orientação na DT. A flexibilidade resulta do baixo teor de cristalinidade [35].

Uma das diferenças mais óbvias entre o processamento do PEAD e do PEBD é que o PEAD geralmente é processado com uma grande altura de linha de névoa. A altura é geralmente da ordem de 8 a 10 vezes o diâmetro da matriz. O PEAD tende a ter uma menor resistência do fundido do que o PEBD, então a estabilidade do balão pode ser mais problemática. Ao atrasar o estiramento transversal do balão até que o material fundido esteja mais resfriado, isto é, tendo uma linha de névoa elevada, o balão fica mais estável [35].

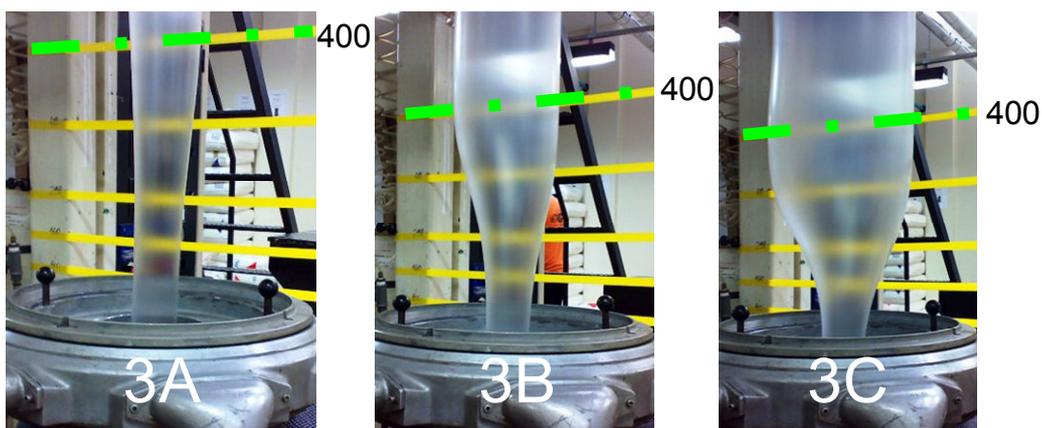
O PEAD tem a mais elevada resistência e rigidez entre os *grades* de polietilenos. Como resultado, há um progresso contínuo na redução da espessura dos produtos de PEAD [35].



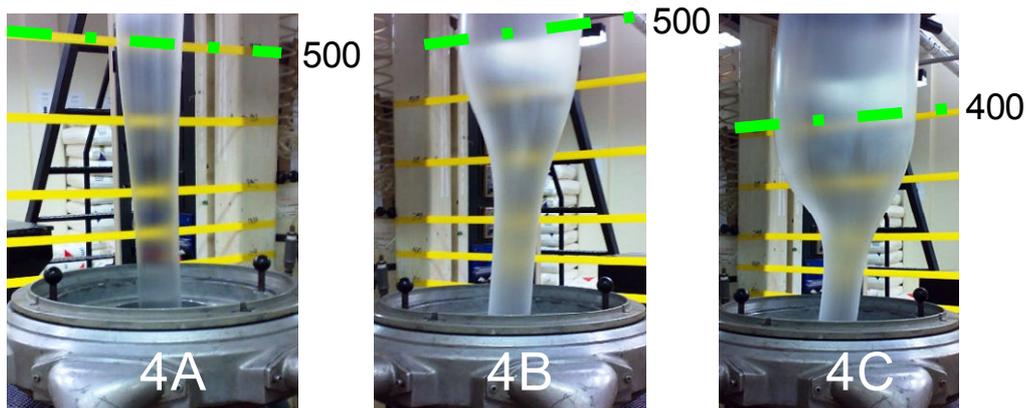
**Figura 37.** Imagens dos filmes tubulares 100% PEBD com registo das alturas das linhas de névoa: 1A – 280mm e R.S = 1,5:1; 1B – 320mm e R.S. = 2,5:1 e 1C – 320mm e R.S. = 3,5:1.



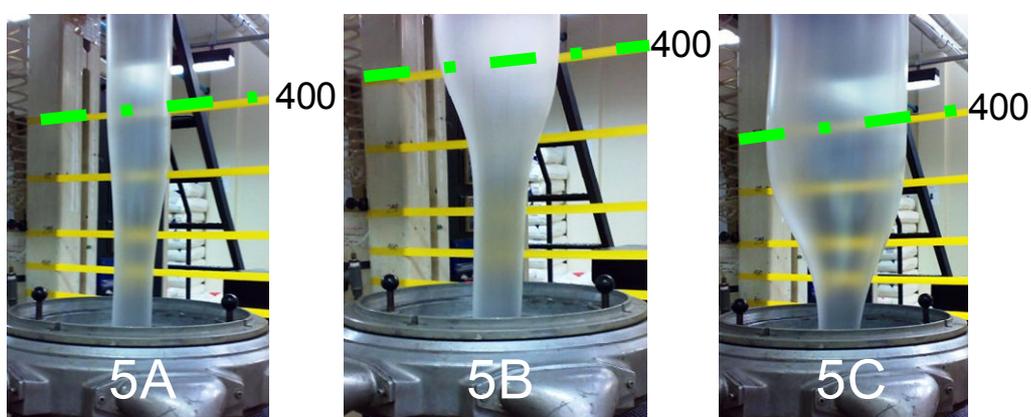
**Figura 38.** Imagens dos filmes tubulares PEBD / PEAD (75 / 25) com registo das alturas das linhas de névoa: 2A – 180mm e R.S = 1,5:1; 2B – 180mm e R.S. = 2,5:1 e 2C – 270mm e R.S. = 3,5:1.



**Figura 39.** Imagens dos filmes tubulares PEBD / PEAD (50 / 50) com registo das alturas das linhas de névoa: 3A – 400mm e R.S = 1,5:1; 3B – 400mm e R.S. = 2,5:1 e 3C – 400mm e R.S. = 3,5:1.



**Figura 40.** Imagens dos filmes tubulares PEBD / PEAD (25 / 75) com registro das alturas das linhas de névoa: 4A – 500mm e R.S = 1,5:1; 4B – 500mm e R.S. = 2,5:1 e 4C – 400mm e R.S. = 3,5:1.



**Figura 41.** Imagens dos filmes tubulares 100% PEAD com registro das alturas das linhas de névoa: 5A – 400mm e R.S = 1,5:1; 5B – 400mm e R.S. = 2,5:1 e 5C – 400mm e R.S. = 3,5:1.

## 5.2. Análise da Dispersão de Espessuras dos Filmes

Tendo em vista que a espessura influencia diretamente nos resultados das análises, as amostras sempre foram selecionadas com espessura próxima dos  $60\mu\text{m}$ . É necessário registrar a grande variação da distribuição de espessuras no perímetro dos filmes processados, e também das médias de espessuras entre as amostras (ver Tabelas 12 a 16, e Figuras 42 a 56). As Figuras de 42 a 56 mostram a distribuição de espessura no perímetro do balão dos filmes processados, com posicionamento definido em relação à extrusora e aos parafusos de ajuste da matriz de conformação, indicada com linha pontilhada de cor azul escura; e as outras linhas coloridas identificadas pela cor laranja (LSE: Limite Superior de Especificação), a cor lilás (LIE: Limite Inferior de Especificação), e a cor azul claro (LME: Limite Médio de Especificação).

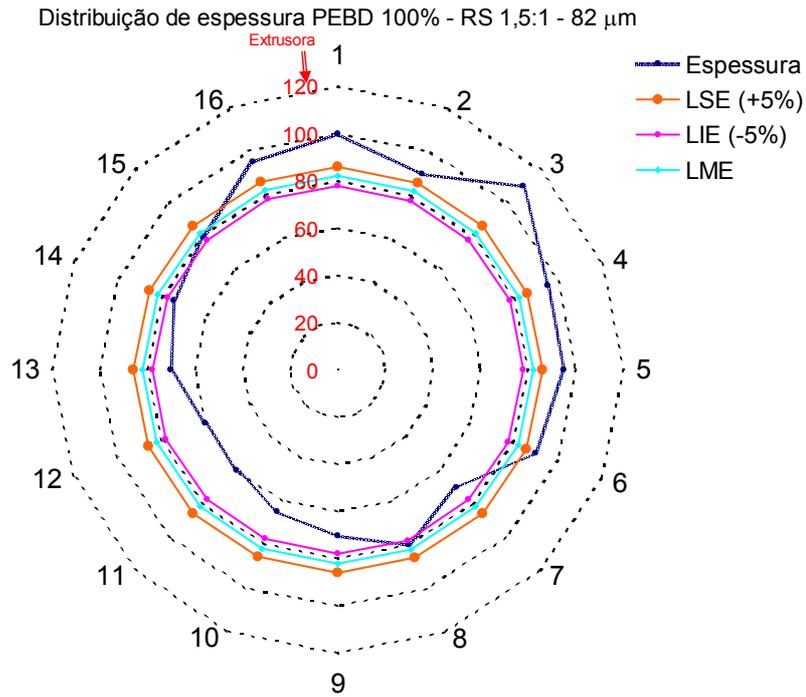
Constata-se que os filmes da composição de PEBD (1A, 1B e 1C) das Figuras 42, 43 e 44, apresentam uma distribuição da espessura mais homogênea, quando comparadas

com as outras composições, sendo a melhor correspondente ao filme processado com a razão de sopro de 2,5:1; embora fora da especificação da norma ABNT NBR 15560-1 [51]. Verifica-se também que a cada ajuste de razão de sopro ocorreram distintas distribuições de espessura no perímetro do filme tubular.

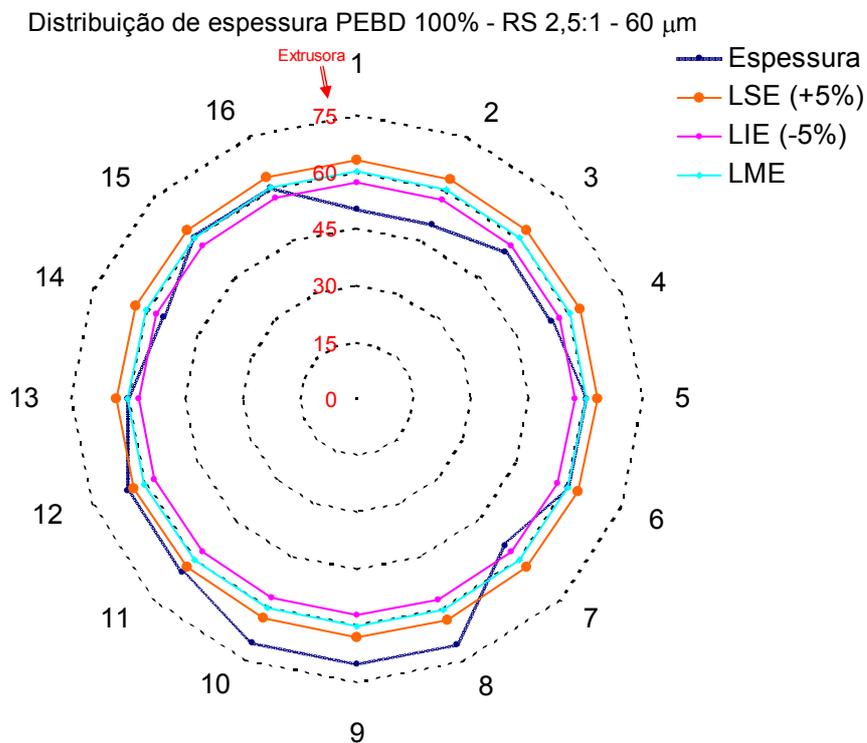
Em filmes tubulares, o projeto da matriz e do anel de ar de resfriamento, as características reológicas do polímero utilizado e as condições de processamento, influenciam sobremaneira no comportamento do fluxo do material fundido pela matriz, e a posterior fixação de geometria do filme; sendo extremamente difícil obter-se um perfil de distribuição de espessura perfeitamente homogêneo e linear. É normal constatar-se o aspecto de “dentes de vampiro”, em pequenas proporções [64-67].

É comum encontrarem-se em aplicações industriais/comerciais equipamentos com problemas de geometria da matriz e/ou com anel de ar que não proporciona a distribuição homogênea do ar de resfriamento no perímetro do filme, o que é o caso também do equipamento utilizado neste trabalho. Além disso, uma maior razão de sopro amplia o problema da má distribuição de espessuras [64-67], conforme constatado na análise dos gráficos de distribuição de espessura.

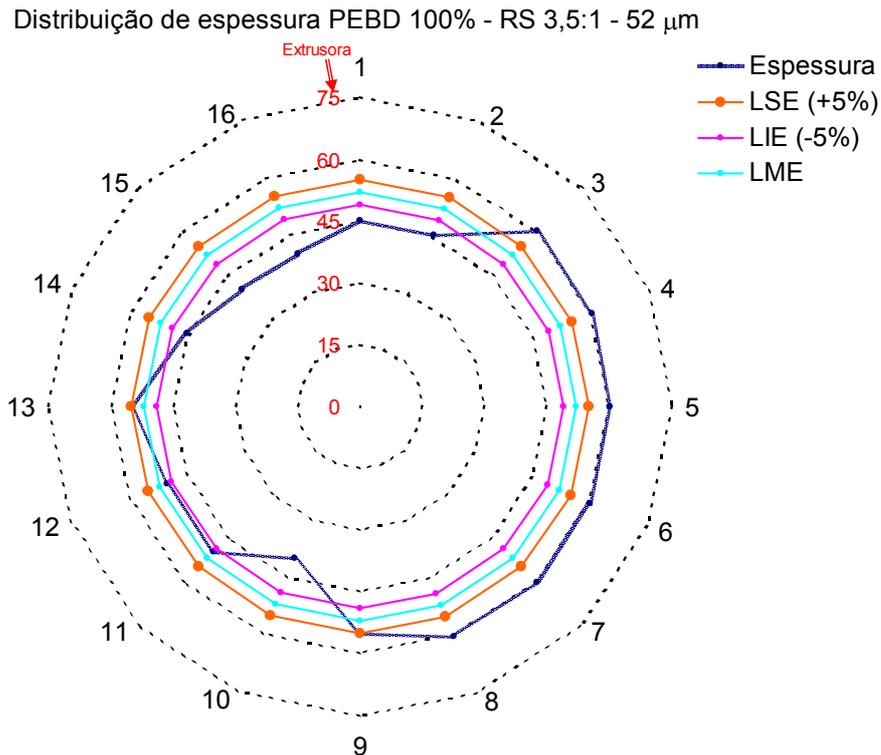
O equipamento de extrusão utilizado neste trabalho é antigo, ano 1985, e possui problemas evidentes de concentricidade da folga entre a fêmea e o mandril da matriz. O anel de ar de resfriamento é de lábio simples e conceito antigo de chicanas internas, que não propiciam uma homogeneidade adequada de vazão do ar de resfriamento no perímetro do filme tubular. Também o sistema de fixação do mandril não proporciona garantia da rigidez necessária, ele, por vezes, se movimenta lateralmente modificando a folga anteriormente ajustada. As várias formulações utilizadas possuem grandes diferenças de viscosidades e, portanto, reologias diferenciadas que mudam a distribuição do fluxo da massa fundida na saída da matriz. Além destes fatores, também os processamentos da formulação de PEBD puro e das blendas e do PEAD puro, ocorreram em datas distintas, com condições ambientais diferentes e não controladas, o que pode haver influenciado sobremaneira nos resultados.



**Figura 42.** Distribuição de espessura do filme 1A: 100% PEBD, razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 82 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.



**Figura 43.** Distribuição de espessura do filme 1B: 100% PEBD, razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 60 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

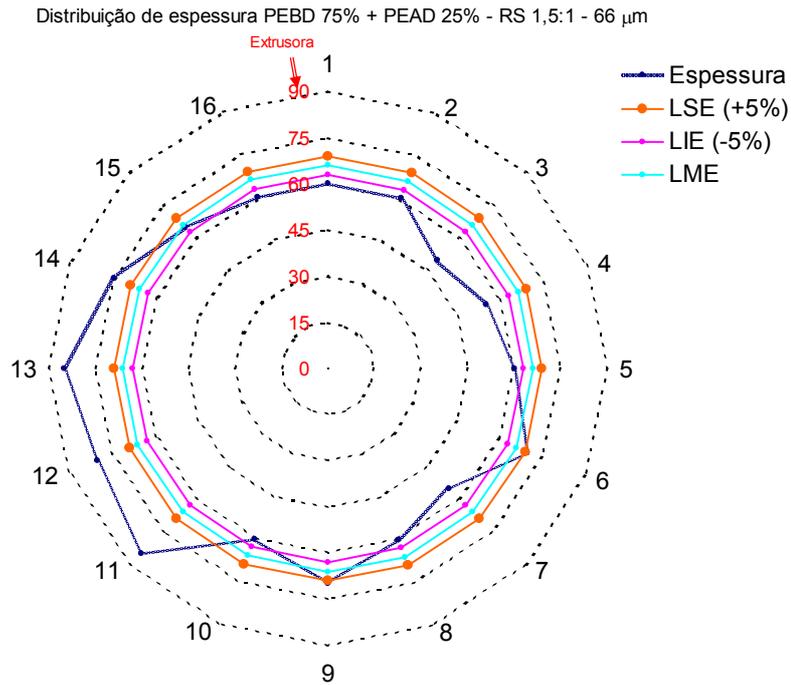


**Figura 44.** Distribuição de espessura do filme 1C: 100% PEBD, razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 52 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

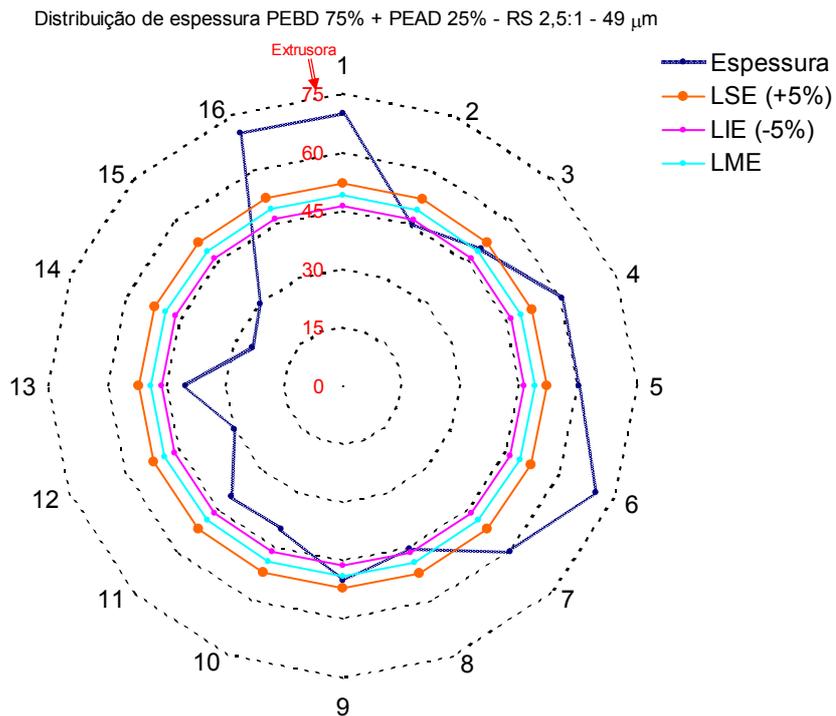
No caso das distribuições de espessuras dos filmes, compostos pelas blendas de PEBD/PEAD e do PEAD (100%) mostradas nas Figuras 45-53 e 54-56, respectivamente, observa-se serem heterogêneas. Fato que pode ser devido às diferentes composições das amostras, ou porque foi processado num outro dia em que não houve tempo hábil e material necessários para efetuarem-se correções, que em situações de produção industrial/comercial seriam efetuadas, conforme analisado na literatura [64-67].

Cabe ressaltar que os filmes da blenda de PEBD/PEAD (75/25) com razão de sopro de 1,5:1 da Figura 45, foi a que apresentou uma variação menor quando comparada as outras blendas e ao PEAD. Fato que pode estar relacionado à composição das amostras e ao comportamento reológico destas.

Portanto, o maior teor de PEAD na blenda e o aumento da razão de sopro apresentaram uma maior variação de espessura dos filmes.

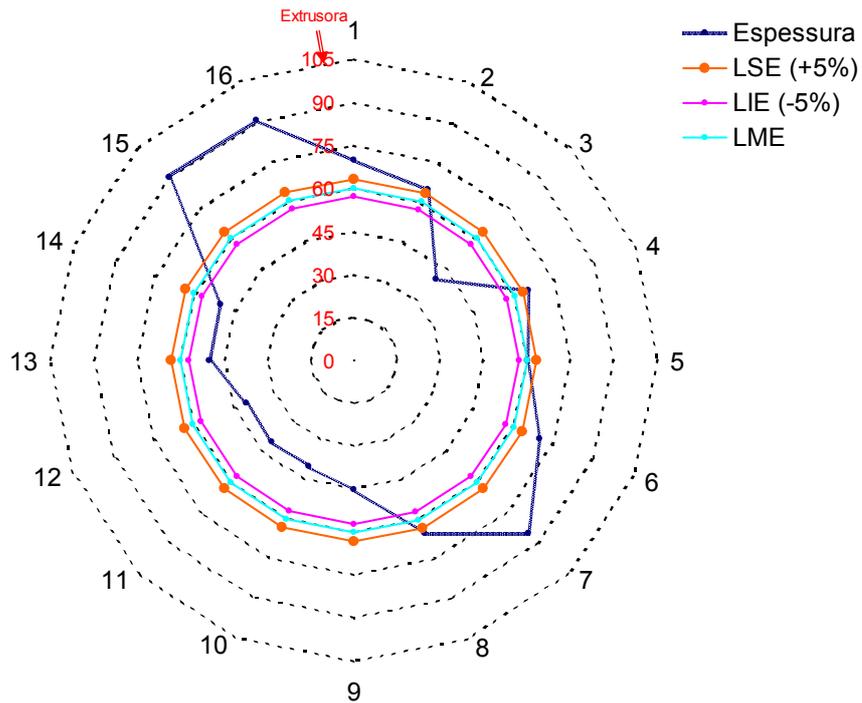


**Figura 45.** Distribuição de espessura do filme 2A: PEBD / PEAD (75 / 25), razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 66 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.



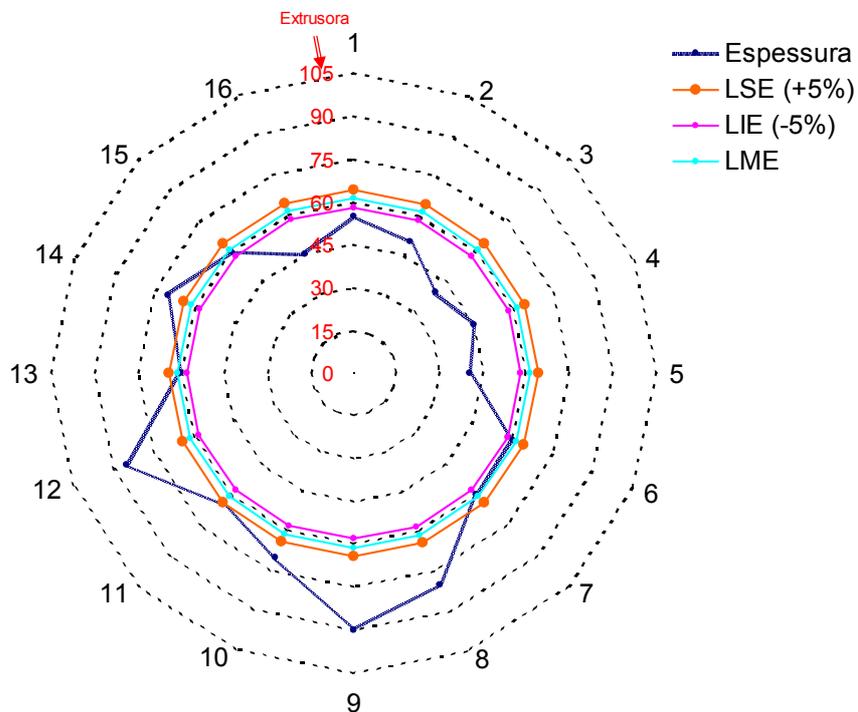
**Figura 46.** Distribuição de espessura do filme 2B: PEBD / PEAD (75 / 25) razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 49 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

Distribuição de espessura PEBD 75% + PEAD 25% - RS 3,5:1 - 60  $\mu\text{m}$

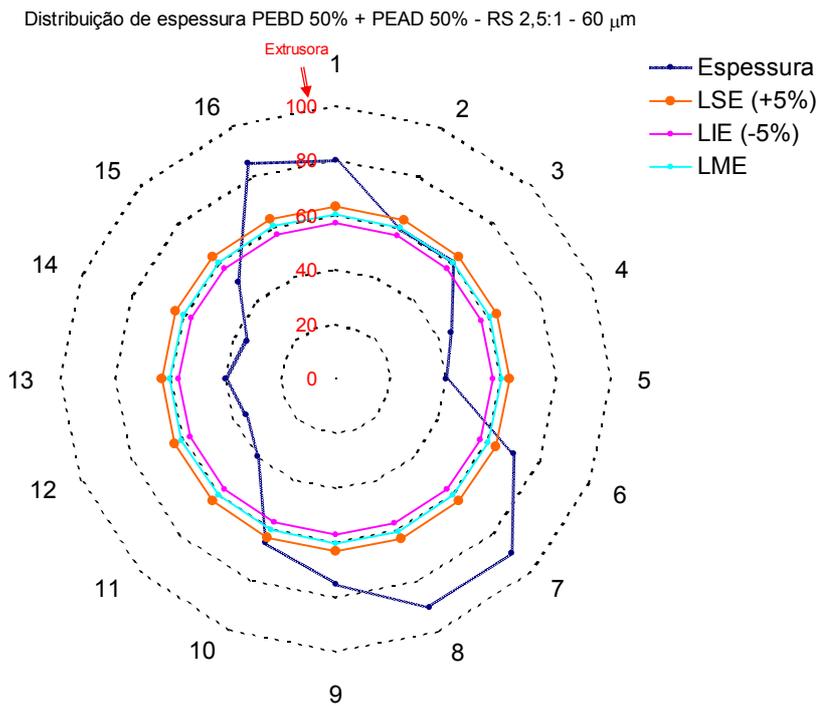


**Figura 47.** Distribuição de espessura do filme 2C: PEBD / PEAD (75 / 25), razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 60 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

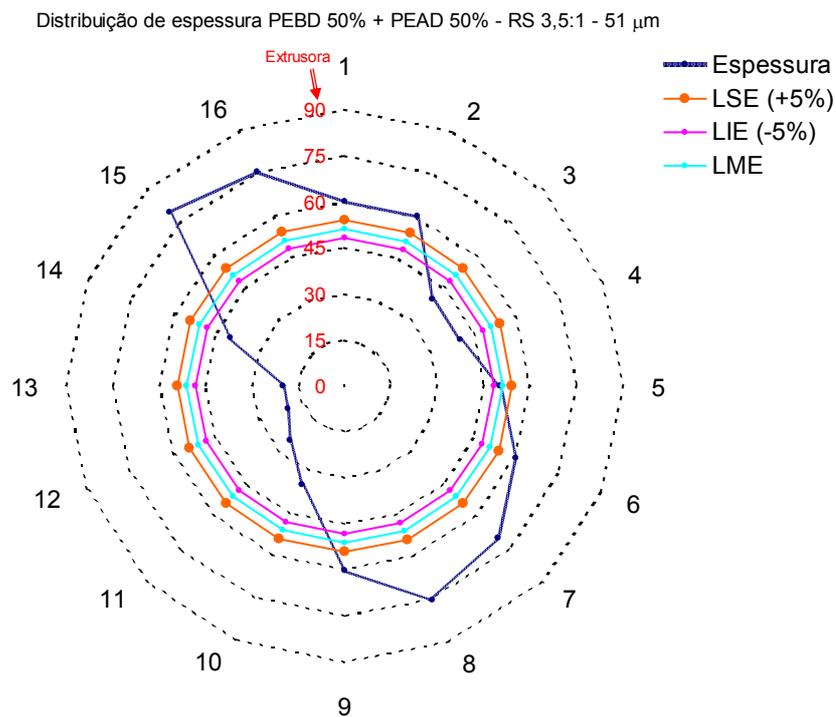
Distribuição de espessura PEBD 50% + PEAD 50% - RS 1,5:1 - 61  $\mu\text{m}$



**Figura 48.** Distribuição de espessura do filme 3A: PEBD / PEAD (50 / 50), razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 61 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

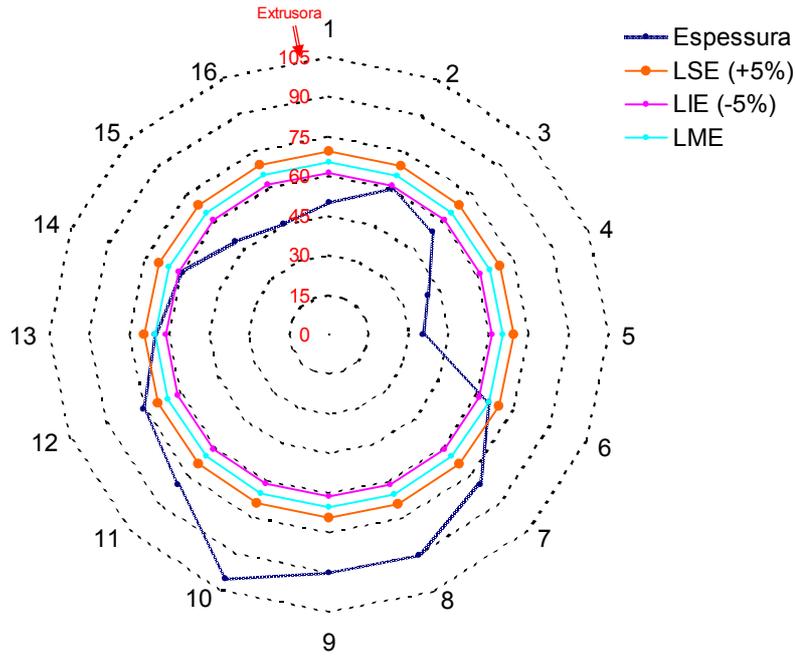


**Figura 49.** Distribuição de espessura do filme 3B: PEBD / PEAD (50 / 50), razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 60 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.



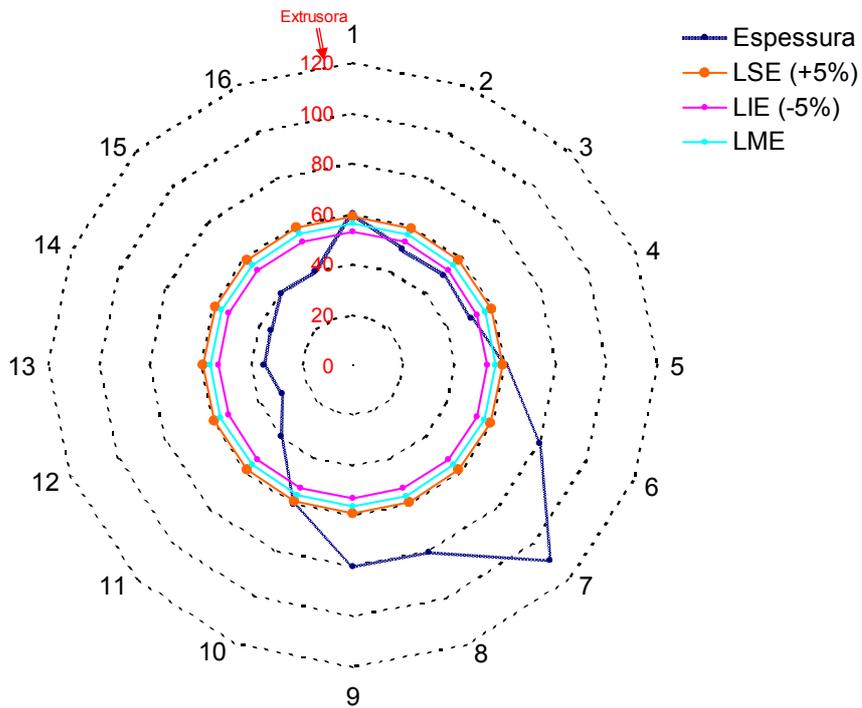
**Figura 50.** Distribuição de espessura do filme 3C: PEBD / PEAD (50 / 50), razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 51 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

Distribuição de espessura PEBD 25% + PEAD 75% - RS 1,5:1 - 65  $\mu\text{m}$



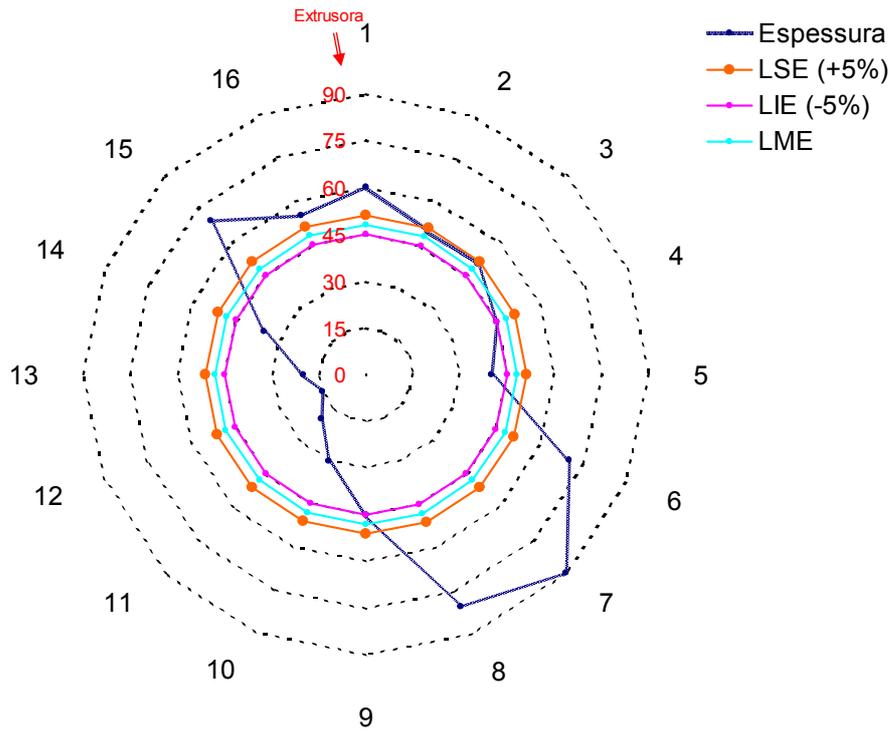
**Figura 51.** Distribuição de espessura do filme 4A: PEBD / PEAD (25 / 75), razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 65 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

Distribuição de espessura PEBD 25% + PEAD 75% - RS 2,5:1 - 56  $\mu\text{m}$



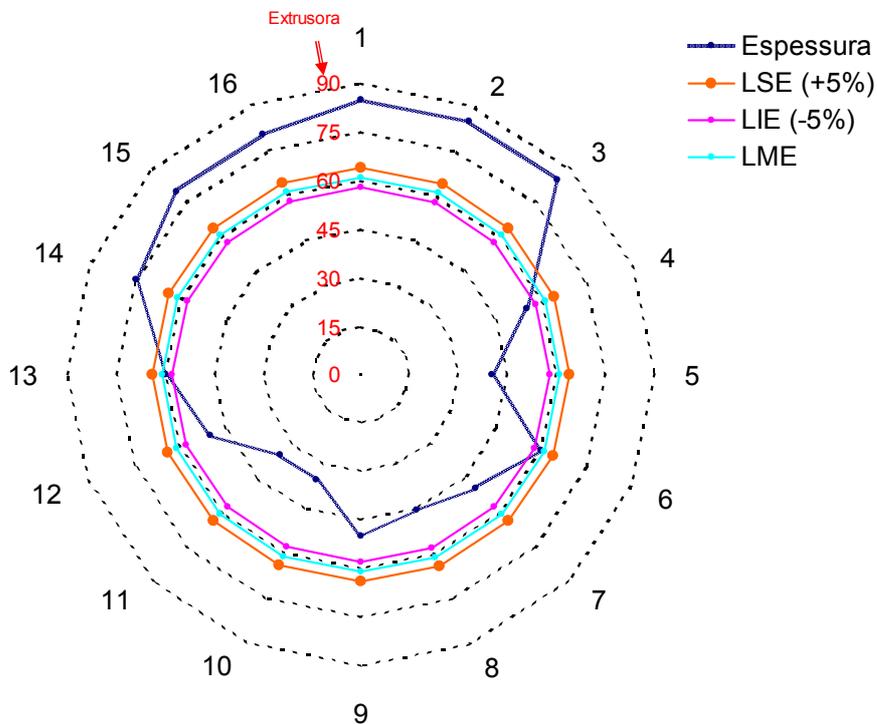
**Figura 52.** Distribuição de espessura do filme 4B: PEBD / PEAD (25 / 75), razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 56 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

Distribuição de espessura PEBD 25% + PEAD 75% - RS 3,5:1 - 48  $\mu\text{m}$

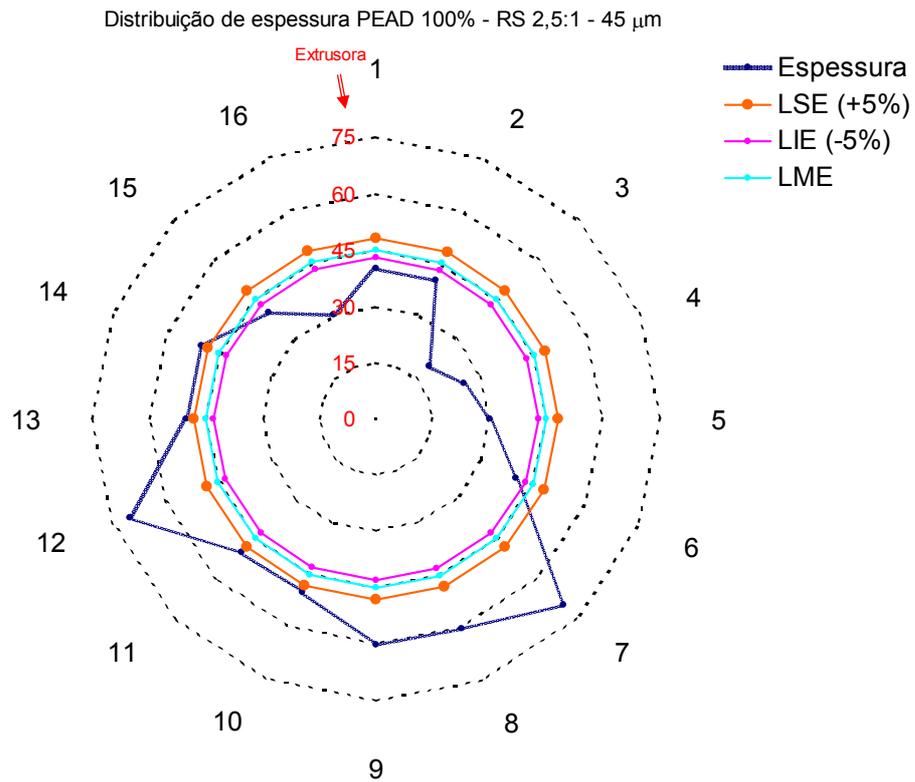


**Figura 53.** Distribuição de espessura do filme 4C: PEBD / PEAD (25 / 75), razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 48 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

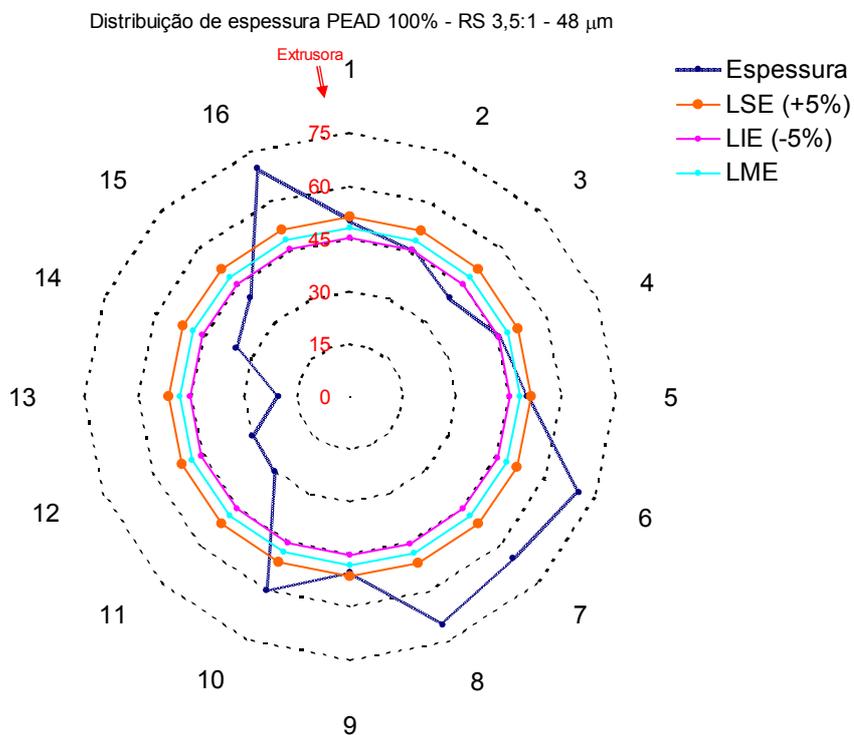
Distribuição de espessura PEAD 100% - RS 1,5:1 - 61  $\mu\text{m}$



**Figura 54.** Distribuição de espessura do filme 5A: 100% PEAD, razão de sopro de 1,5:1, espessura média de 61 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.



**Figura 55.** Distribuição de espessura do filme 5B: 100% PEAD, razão de sopro de 2,5:1, espessura média de 45 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.



**Figura 56.** Distribuição de espessura do filme 5C: 100% PEAD, razão de sopro de 3,5:1, espessura média de 48 $\mu\text{m}$ , limites de especificação de +/- 5% da espessura média.

### **5.3. Largura dos Filmes**

Os resultados das medições de largura tubular dos filmes estão registrados nas Tabelas de 8 a 12, e foram sempre de 190mm, 315mm e 440mm, relativos às razões de sopro de 1,5:1, 2,5:1 e 3,5:1, respectivamente, em todas as composições de matérias primas (1, 2, 3, 4 e 5). Não se verificou qualquer variação significativa na largura.

A estabilidade de largura se explica facilmente quando se analisa o processamento dos filmes. A íris de estabilização do balão, fixada na estrutura da torre, acima da matriz, possui uma graduação de ajustes relacionada diretamente à largura do filme tubular pretendido. No início de cada produção esta íris foi ajustada para a respectiva razão de sopro e o balão foi então insuflado até fazer contato em todo perímetro da mesma. Aguardou-se pequeno período de tempo e realizou-se medição de largura do filme junto à bobinadeira. Quando necessário foram realizados ajustes no volume de ar interno do balão até se obter a largura exata pretendida. Também, não se constata qualquer variação na largura dos filmes produzidos, devido a que os processamentos ocorreram unicamente para obtenção de amostras dos filmes, ou seja, é pouco tempo para que qualquer alteração possa ser percebida. Em produções industriais/comerciais é normal ocorrerem flutuações pequenas na largura dos filmes, devido a mudanças nas condições ambientais e nas variáveis de processamento com o decorrer do tempo, estas tolerâncias estão previstas na norma ABNT NBR 15560-1 [51].

### **5.4. Coeficiente de Fricção – COF**

Um dos ensaios indiretos para avaliar se houve influência da composição das amostras assim como das razões de sopro na rugosidade das superfícies interna e externa dos filmes tubulares, é o coeficiente de atrito, COF. Os resultados de COF da superfície dos filmes em contato interno/interno e externo/externo são apresentados na Figura 57.

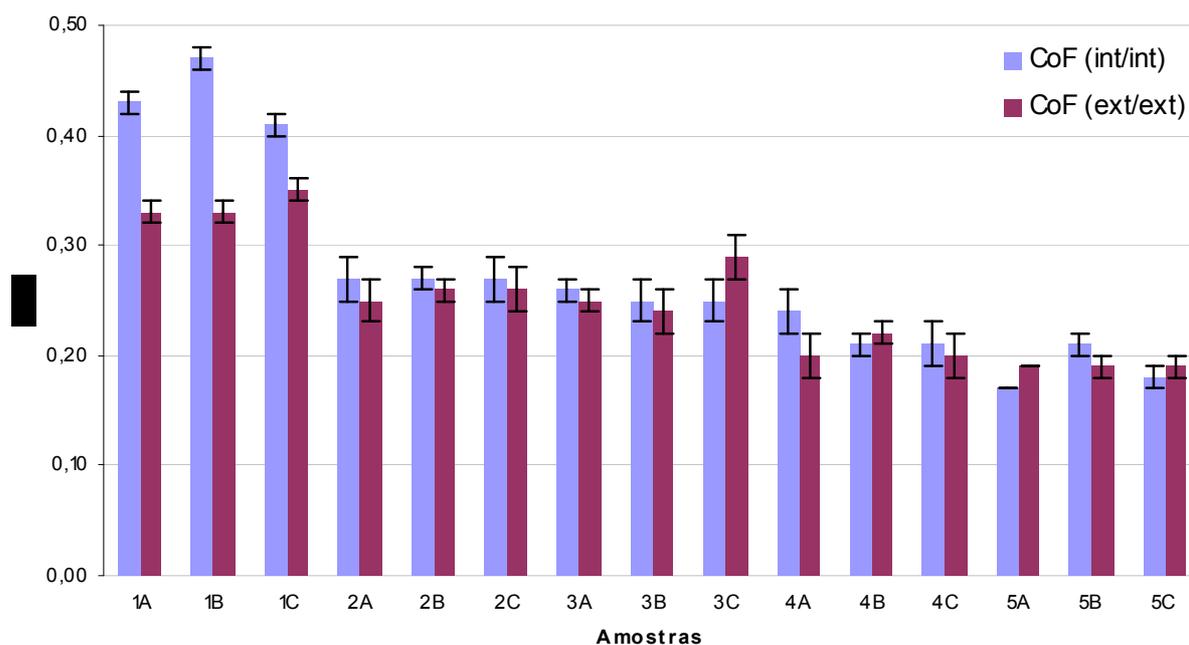
Observa-se que as amostras de PEBD (1A, 1B e 1C) apresentaram resultados de COF interno/interno e externo/externo, superiores as outras amostras. Considerando apenas os valores médios, é verificada que a presença de maior teor de PEAD na blenda diminui o COF, assim como na amostra de PEAD (100%) cujo COF foi o menor de todos. Com relação a razão de sopro, não foi possível distinguir alguma diferença significativa da influência deste parâmetro de processamento no valor do COF.

Também é observado que o COF das superfícies internas dos filmes é, as vezes, maior do que o COF das superfícies externas, embora sendo estatisticamente similares. Esta diferença dos valores dos coeficientes: externo e/ou interno dos filmes, pode ser explicada porque mesmo sendo o filme de paredes pouco espessas, o que facilita a

transmissão de calor, ocorre um acréscimo da temperatura do ar interno do balão, que está aprisionado (sem renovação), e com isso um processo de cristalização da superfície interna um pouco diferenciado em relação ao da superfície externa;

De acordo com a literatura [68], dois motivos principais esclarecem a aspereza de superfície: irregularidades induzidas pelo fluxo e estruturas cristalinas projetadas. O fluxo é um efeito reológico conhecido que pode finalmente ser correlacionado com a arquitetura molecular. A aspereza da cristalização foi postulada para ocorrer devido à formação de agregados cristalinos na superfície dos filmes ou próximo da superfície [69].

Este experimento anterior [69] estudou uma grande faixa de materiais semicristalinos (PEBD, PEAD, PEBDL, PP e PBT) e amorfos (PS e PMMA), e encontrou que a cristalização é a razão preliminar para a aspereza da superfície, enquanto o efeito reológico desempenha um papel secundário, mas importante [64]. Para os filmes soprados de PEBD convencional, a elasticidade da massa fundida é a causa principal da aspereza, enquanto que uma maior aspereza no PEAD foi atribuída geralmente ao seu elevado grau de cristalização [70].



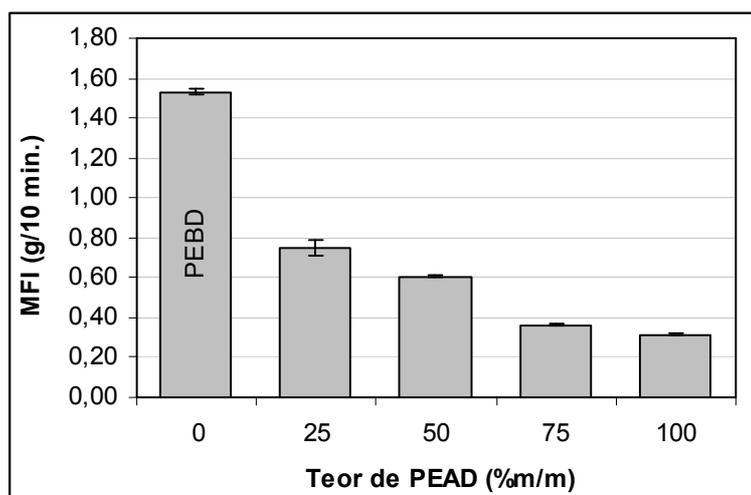
**Figura 57.** Resultados de coeficiente de fricção dinâmico interno/interno e externo/externo.

### 5.5. Índice de Fluidiez

Na Figura 58 são apresentados os valores médios do índice de fluidez (IF) do fundido para cada material utilizado durante o processamento dos filmes. Observa-se que o PEAD apresenta um IF baixo, indicando ser mais viscoso e que esse comportamento

influencia na fluidez da blenda, pois com só 25% deste no PEBD, o IF da blenda vai de PEBD puro de 1,51g/10min. para 0,75g/10min. No geral, verifica-se haver um seqüenciamento lógico dos índices de fluidez de acordo com as matérias-primas utilizadas.

Peacock [5] define o IF de uma resina de polietileno a uma relação de como ela flui através de uma matriz capilar sobre condições de teste padrão. O IF depende das características moleculares, do peso molecular médio, distribuição do peso molecular e características de ramificações (cadeias curtas versus cadeias longas, sua concentração e distribuição). O IF reflete as dimensões médias das moléculas de uma resina e suas interligações. Do ponto de vista comercial, o IF é usado como uma referência de características de fluxo para um processo de transformação. Cuidado deve ser tomado ao se considerar somente o IF, sem levar em conta as mudanças de viscosidade em função da taxa de cisalhamento, pois isto terá reflexo na resposta da resina quando submetida aos vários níveis de cisalhamento a que estará submetida em um processo de transformação. Ou seja, o IF é uma das muitas características usadas para definir uma resina de polietileno.



**Figura 58.** Índice de fluidez (190°C/5kg) do fundido das amostras de PEBD/PEAD com composições: 100/0; 75/25; 50/50; 25/75 e 0/100.

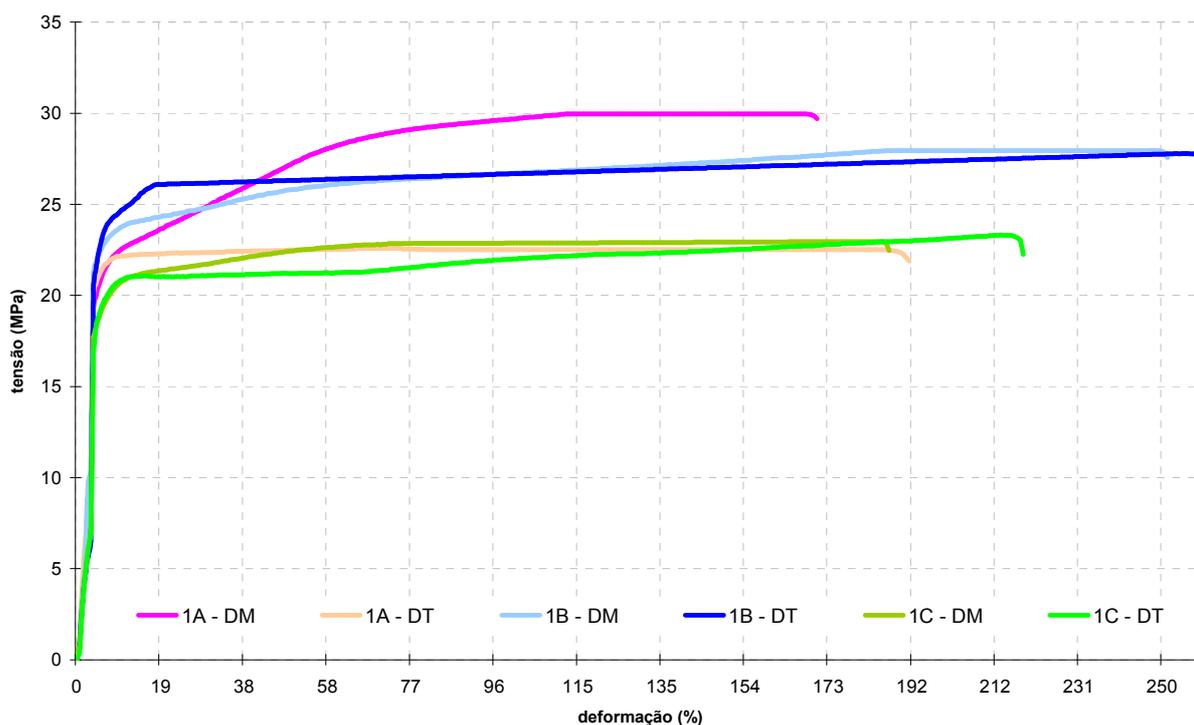
## 5.6. Propriedades Mecânicas - Ensaio de Tração

Para avaliar o desempenho mecânico dos filmes, um dos ensaios mais indicados é o de tração no qual são obtidas, entre outras, as seguintes informações dos filmes: resistência à tração na ruptura e de deformação de ruptura, na direção de máquina - DM e na direção transversal - DT. Os valores obtidos destes ensaios são de extrema importância na definição de quão melhor é o comportamento de uma determinada formulação em relação à outra, e

também de qual a razão de sopro mais adequada, para as exigências da aplicação final do produto.

Na Figura 59 são apresentadas para as amostras de PEBD puro (filmes 1A – RS: 1,5:1; 1B – RS: 2,5:1 e 1C – RS: 3,5:1) as curvas de tensão versus deformação em função da razão de sopro, onde é possível observar, para a R.S.: 1,5:1, tensão na ruptura maior na direção da máquina do que na transversal a esta. Os filmes processados com razão de sopro de 1,5:1 e 2,5:1 apresentaram ser mais resistentes a tração na ruptura na direção da máquina do que aqueles com razão de sopro de 3,5:1. Também foi observado que com o aumento da razão de sopro do filme de PEBD para 3,5:1, as tensões e deformações na ruptura na DM e na DT foram similares.

De acordo com a literatura [28-41] a R.S. ideal para o PEBD ocorre entre 2,5:1 até 3,5:1, proporcionando resultados de propriedades mecânicas mais homogêneas na DM e na DT. Portanto, R.S. de 2,5:1 e menores induzem a uma distribuição molecular orientada na DM, com resultado de tensões maiores que as da DT.



**Figura 59.** Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEBD: 1A – RS: 1,5:1; 1B – RS: 2,5:1 e 1C – RS: 3,5:1

Na Tabela 17 são apresentados os valores resumidos do ensaio de tração, tais como a tensão de ruptura, deformação na ruptura e módulo destas mesmas amostras de PEBD. Observa-se um módulo de elasticidade muito similar variando entre 278 e 283MPa,

demonstrando não sofrer influência significativa da razão de sopro, estando muito mais atrelado às características da matéria-prima em si.

É possível notar-se que há um maior equilíbrio das tensões e deformações na ruptura em ambas as direções DM e DT para os filmes processados com as razões de sopro entre 2,5:1 e 3,5:1, sendo que os valores são os mais elevados para a razão de sopro de 2,5:1. Portanto, constata-se que a razão de sopro ideal para filmes processados com PEBD deve estar em um valor entre 2,5:1 e 3,5:1, corroborando com os valores da literatura [28-41].

Para o processamento na razão de sopro de 1,5:1 revelaram-se valores menores das tensões e deformações na ruptura (exceto o valor de tensão na ruptura para a DM de 30 MPa, o maior de todas as amostras) e muito desequilibrados entre as direções DM e DT. Isto indica claramente uma orientação molecular preferencial do filme processado na DM, em prejuízo da distribuição na DT, fato esperado pela baixa razão de sopro utilizada. Todas as amostras demonstraram valores maiores que os mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 15560 – 1 [51], de 17 MPa para a tensão na ruptura e de 150% de deformação na ruptura. Estudo realizado por Pucci e Shroff [70], concluíram que a resistência máxima à ruptura é maior na DM do que na DT, resultado confirmado por Patel et al [71]. Também definem que as tensões na DM e na DT são afetadas pela orientação das moléculas da fase amorfa.

**Tabela 17.** Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEBD (1A – R.S.: 1,5:1, 1B – R.S.: 2,5:1 e 1C – R.S.: 3,5:1)

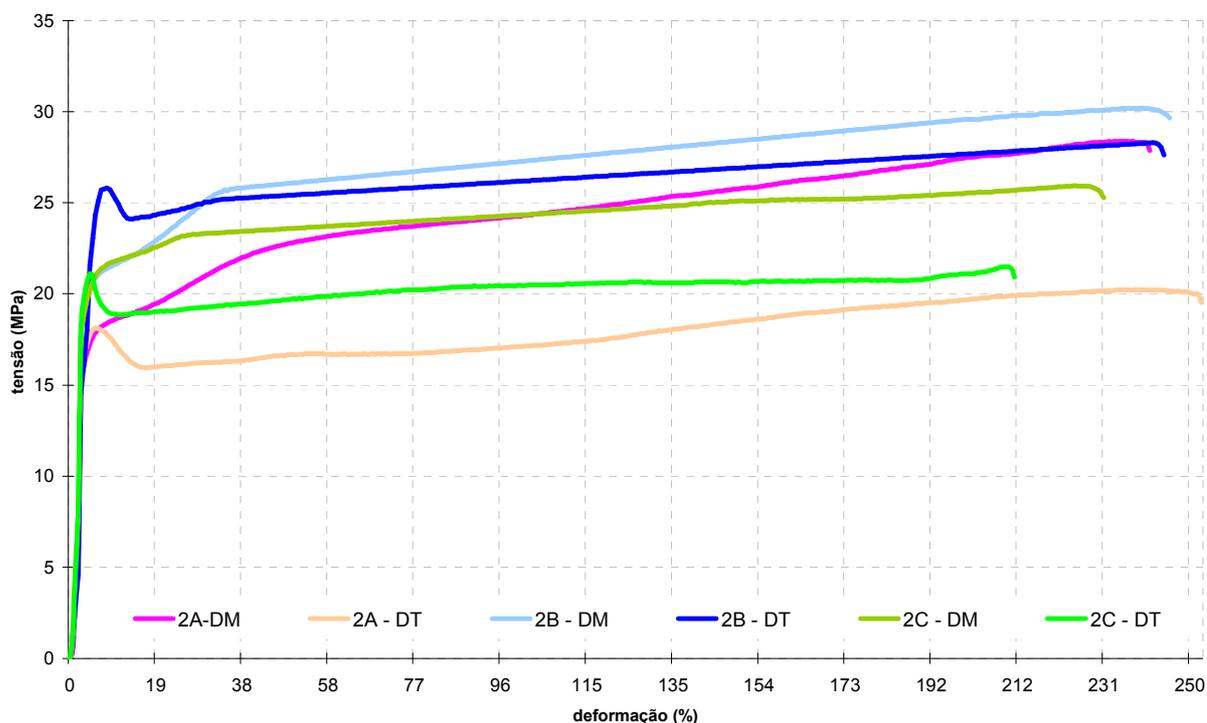
Amostras	1A		1B		1C	
	1,5:1		2,5:1		3,5:1	
Razão de sopro	1,5:1		2,5:1		3,5:1	
Direção da amostra	DM	DT	DM	DT	DM	DT
Tensão na ruptura(MPa)	30	23	28	28	23	23
Deformação na ruptura (%)	168	184	247	254	185	213
Tensão escoamento (MPa)	20	20	21	21	24	26
Deformação no escoamento (%)	12	12	15	18	16	16
Módulo de elasticidade (MPa) *	282	280	283	282	278	279

\* velocidade de 500 mm/min

Na Figura 60 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação em função da razão de sopro para as amostras da blenda de PEBD/PEAD (75/25). Na Tabela 18 se apresentam os valores de tensão de ruptura, deformação na ruptura e módulo destas mesmas amostras de blenda.

Os módulos de elasticidade variaram entre 332 e 444MPa, valores maiores que das amostras de PEBD (1), provavelmente em resposta à adição de 25% de PEAD. Os módulos

mais elevados e muito próximos são constatados para a razão de sopro de 3,5:1 - 2C, de 427MPa na DM e de 444MPa na DT.



**Figura 60.** Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEBD/PEAD (75/25): 2A – R.S 1,5:1; 2B – R.S.: 2,5:1 e 2C – RS.: 3,5:1

**Tabela 18.** Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEBD/PEAD (75/25): (2A – R.S.: 1,5:1, 2B – R.S: 2,5:1 e 2C – R.S: 3,5:1)

Amostras	2A		2B		2C	
	1,5:1		2,5:1		3,5:1	
Direção da amostra	DM	DT	DM	DT	DM	DT
Tensão na ruptura(MPa)	28	20	30	28	26	21
Deformação na ruptura (%)	238	251	242	242	224	209
Tensão no escoamento (MPa)	18	18	21	24	22	19
Deformação no escoamento (%)	6	6	8	15	9	9
Módulo de elasticidade (MPa) *	341	349	342	332	427	444

\* velocidade de 500 mm/min

Observa-se que os valores de tensão de ruptura permaneceram similares aos das amostras de PEBD (1); porém observa-se que as curvas dos filmes testados na DT apresentaram o ponto de escoamento que não é formado nas curvas da DM, característico da formação de pescoço no corpo de prova. Entretanto, houve um acréscimo e maior homogeneidade das deformações na ruptura para todas as condições de processamento. Ainda permanece um maior equilíbrio das tensões e deformações na ruptura em ambas as direções DM e DT para os filmes processados com as razões de sopro entre 2,5:1 e 3,5:1,

sendo que os valores são os mais elevados para a razão de sopro de 2,5:1. Portanto, constata-se que a razão de sopro ideal para filmes processados com esta blenda de PEBD/PEAD (75/25) deve estar em um valor entre 2,5:1 e 3,5:1.

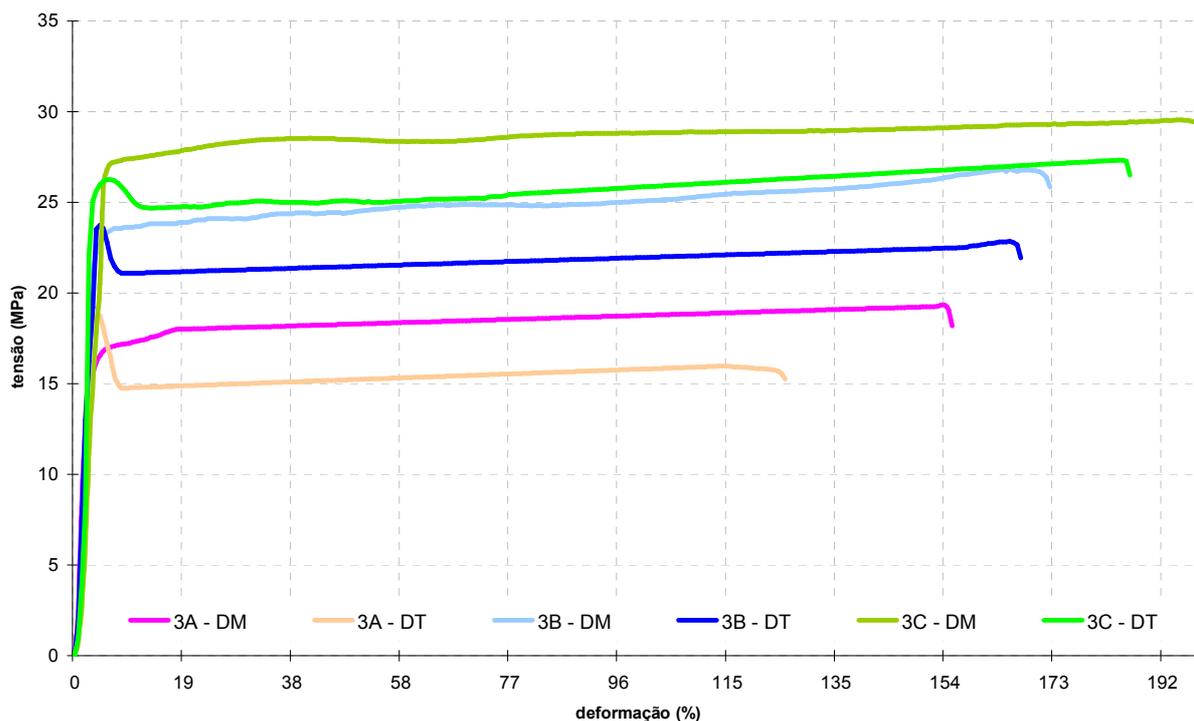
Com a razão de sopro de 1,5:1 revelaram-se valores mais desequilibrados das tensões e deformações na ruptura entre as direções DM e DT, indicando a orientação molecular preferencial do filme processado na DM, em prejuízo da distribuição na DT, fato esperado pela baixa razão de sopro utilizada [31-38].

Da mesma forma que para as amostras de PEBD (1), todas as amostras da blenda de PEBD/PEAD (75/25) (2), também demonstraram valores maiores que os mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 15560 – 1 [51], de 17MPa para a tensão na ruptura e de 150% de deformação na ruptura.

Como anteriormente comentado, o acréscimo no módulo de elasticidade em relação às amostras de PEBD (1) pela adição de 25% de PEAD é confirmado na literatura [31-38], com diferenças significativas nas propriedades físicas observadas nos filmes soprados de PEBD e PEAD. Parâmetros estruturais, como densidade e cristalinidade, peso molecular e sua distribuição, cadeias de ramificação curtas e cadeias de ramificação longas e sua quantidade, e a morfologia cristalina são os fatores chave que controlam as propriedades. O PEAD é o polietileno mais cristalino, tendo em vista que suas cadeias são lineares e contêm pouca ramificação. Ele demonstra módulo elevado, propriedades elásticas médias, pobre impacto e resistência ao rasgo. O PEBD que contém cadeias de ramificação longas na ordem de 1-3 por 1000 átomos de carbono assim como 10-30 cadeias de ramificação curtas por 1000 átomos de carbono, demonstra baixa tensão elástica, e médios módulo, impacto e resistência ao rasgo [5-13].

Na Figura 61 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação em função da razão de sopro para as amostras da blenda de PEBD/PEAD (50/50) e na Tabela 19 são apresentados todos os resultados obtidos pelo ensaio de tração (tensão e deformação na ruptura, assim como o módulo de Young).

Da mesma forma do que na blenda da Figura 60, observa-se também o ponto de escoamento das curvas dos filmes testados na DT, sendo mais pronunciado na razão de sopro de 2,5:1; já nas curvas da DM não houve formação.



**Figura 61.** Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEBD/PEAD (50/50): 3A – R.S 1,5:1; 3B – R.S.: 2,5:1 e 3C – R.S.: 3,5:1

**Tabela 19.** Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEBD/PEAD (50/50) (3A – R.S.: 1,5:1, 3B – R.S.: 2,5:1 e 3C – R.S.: 3,5:1)

Amostras	3A		3B		3C	
	1,5:1		2,5:1		3,5:1	
Razão de sopro	1,5:1		2,5:1		3,5:1	
Direção da amostra	DM	DT	DM	DT	DM	DT
Tensão na ruptura(MPa)	19	16	27	23	29	27
Deformação na ruptura (%)	154	124	171	167	199	186
Tensão no escoamento (MPa)	17	18	24	21	27	25
Deformação no escoamento (%)	5	5	7	9	12	12
Módulo de elasticidade (MPa) *	844	735	683	892	431	366

\* velocidade de 500 mm/min

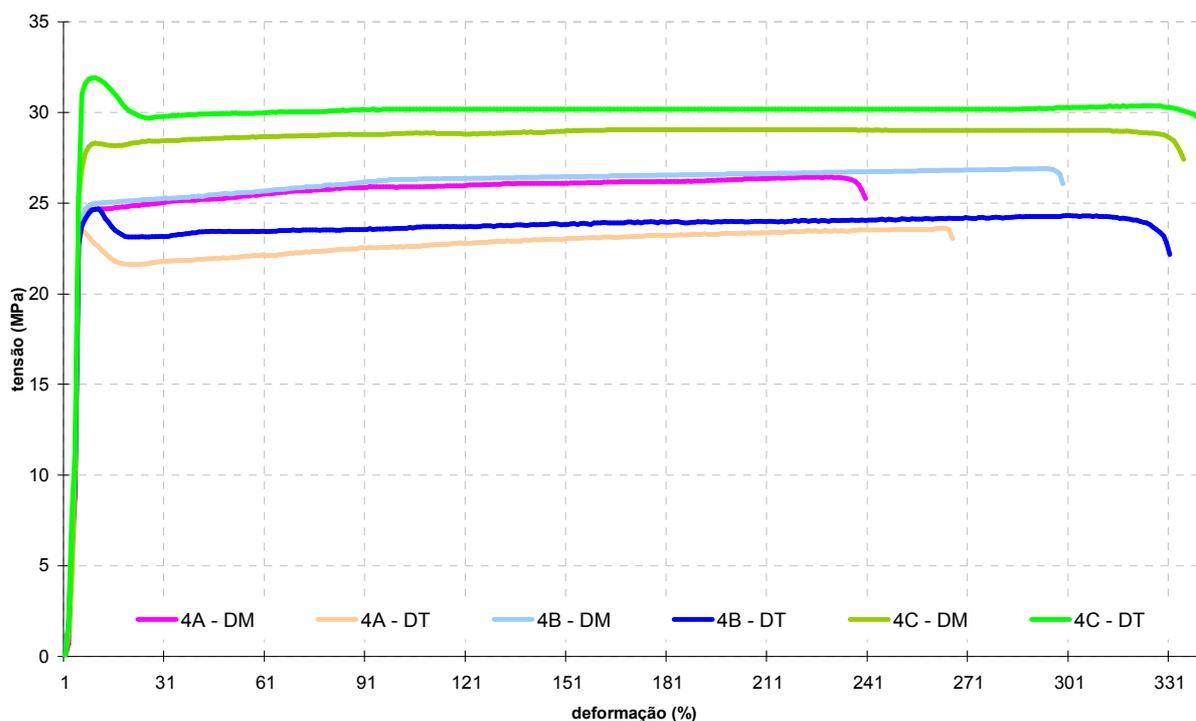
Os módulos de elasticidade variaram entre 366 e 892MPa, valores maiores que das amostras 1 e 2, provavelmente em resposta à adição de 50% de PEAD [31-38].

Observa-se que os valores de tensão de ruptura permaneceram similares aos das amostras 1 e 2, menos para a condição 3A – R.S. 1,5:1. Houve um acréscimo e maior homogeneidade das tensões e deformações na ruptura para a condição de processamento 3C – R.S. 3,5:1. Embora se verifique um maior equilíbrio das tensões e deformações na ruptura em ambas as direções DM e DT para os filmes processados com as razões de sopro entre 2,5:1 e 3,5:1, observa-se que os valores são os mais elevados para a razão de sopro de 3,5:1, indicando uma mudança em relação às amostras 1 e 2. Portanto, constata-se que

a razão de sopro ideal para filmes processados com esta blenda de PEBD/PEAD (50/50) deve estar em um valor próximo a 3,5:1.

De forma distinta que para as amostras 1 e 2, as amostras na DT, da condição de processamento 3A – R.S. 1,5:1 obtiveram valores menores que os mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 15560 – 1 [51], de 17MPa para a tensão na ruptura e de 150% de deformação na ruptura. Os valores obtidos foram de 16MPa para a tensão na ruptura e de 124% de deformação na ruptura.

Na Figura 62 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação em função da razão de sopro das amostras da blenda de PEBD/PEAD (25/75) e na Tabela 20 são apresentados os valores de tensão de ruptura, deformação na ruptura e módulo de Young. Da mesma forma do que na blenda da Figura 61, observa-se também o ponto de escoamento nas curvas dos filmes testados na DT e não houve formação nas curvas da DM.



**Figura 62.** Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEBD/PEAD (25/75): 4A – R.S.: 1,5:1; 4B – R.S.: 2,5:1 e 4C – R.S.: 3,5:1

Os módulos de elasticidade variaram entre 486 e 780MPa, valores similares aos das amostras 3, porém distribuídos de forma mais homogênea em todas as condições de processamento.

**Tabela 20.** Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEBD/PEAD (25/75) (4A – R.S.: 1,5:1, 4B – R.S: 2,5:1 e 4C – R.S: 3,5:1)

<b>Amostras</b>	<b>4A</b>		<b>4B</b>		<b>4C</b>	
<b>Razão de sopro</b>	<b>1,5:1</b>		<b>2,5:1</b>		<b>3,5:1</b>	
<b>Direção da amostra</b>	<b>DM</b>	<b>DT</b>	<b>DM</b>	<b>DT</b>	<b>DM</b>	<b>DT</b>
Tensão na ruptura(MPa)	26	24	27	24	29	30
Deformação na ruptura (%)	152	169	190	209	212	216
Tensão no escoamento (MPa)	25	22	25	24	28	32
Deformação no escoamento (%)	8	8	8	9	11	6
Módulo de elasticidade (MPa) *	489	486	537	552	780	532

\* velocidade de 500 mm/min

Observa-se que os valores de tensão de ruptura e de deformação na ruptura estão mais elevados e homogêneos do que em todas as outras amostragens (1, 2 e 3) em todas as condições de razão de sopro, tanto na DM como na DT. Constata-se que os valores são os mais elevados e homogêneos para a R.S. 3,5:1, confirmando a tendência já identificada nas amostras 3. Portanto, constata-se que a R.S. ideal para filmes processados com esta blenda de PEBD/PEAD (25/75) deve estar em um valor próximo a 3,5:1.

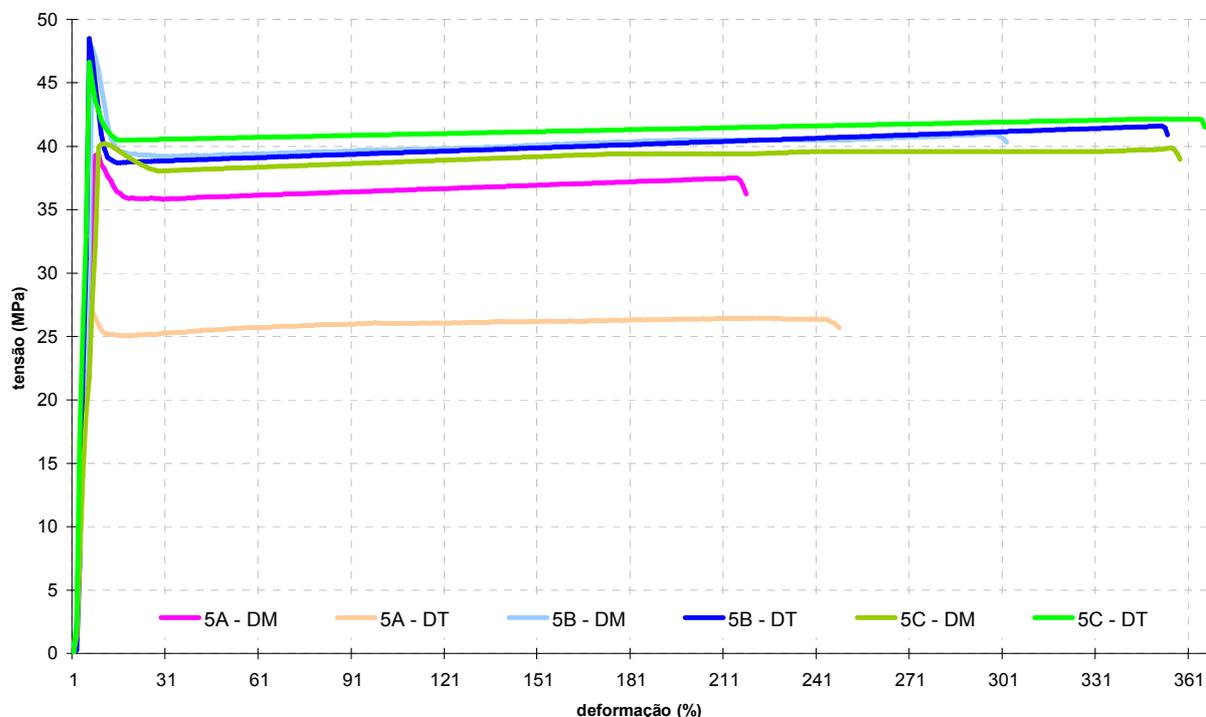
Como já relatado anteriormente, em muitas composições de blendas de PEAD com PEBD são observadas cristalizações separadas dos componentes, com dois picos de fusão distintos [15-20]. Por outro lado, blendas de PEAD com PEBD podem apresentar co-cristalização onde os dois polímeros formam cristais isomórficos, ou seja, as cadeias de ambos os polímeros participam da formação do mesmo cristalito [15, 20-21].

Da mesma forma que para as amostras 1 e 2, todas as amostras 4 também demonstraram valores maiores que os mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 15560 – 1 [51], de 17MPa para a tensão na ruptura e de 150% de deformação na ruptura.

Na Figura 63 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação em função da razão de sopro para as amostras de PEAD puro e na Tabela 21 são apresentados os valores de tensão de ruptura, deformação na ruptura e módulo destas mesmas amostras de PEAD. Os módulos de elasticidade variaram entre 784 e 1190MPa, os maiores valores entre todas amostras, confirmando a expectativa por tratar-se de PEAD puro [31-38].

Observa-se no perfil de todas as curvas dos filmes na DM e na DT apresentarem o ponto de escoamento bem pronunciado. Observa-se que os valores de tensão de ruptura e de deformação na ruptura estão mais elevados e homogêneos do que em todas as outras amostragens (1, 2, 3 e 4) menos na condição de R.S. 1,5:1 – 5A. Constata-se que os valores são os mais elevados e homogêneos para a R.S. de 3,5:1 – 5C, confirmando a tendência já identificada nas amostras 3 e 4, inclusive demonstrando que uma R.S. mais elevada poderá conduzir a melhores resultados. Portanto, constata-se que a R.S. ideal para

filmes processados com PEAD puro deve estar em um valor maior e próximo a 3,5:1. Da mesma forma que para as amostras 1, 2 e 4 todas as amostras 5 também demonstraram valores maiores que os mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 15560 – 1 [51], de 17MPa para a tensão na ruptura e de 150% de deformação na ruptura.



**Figura 63.** Curvas de tração versus deformação dos filmes processados com PEAD: 5A – R.S 1,5:1; 5B – R.S.: 2,5:1 e 5C – RS.: 3,5:1

**Tabela 21.** Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo dos filmes processados com PEAD (5A – R.S.: 1,5:1, 5B – R.S.: 2,5:1 e 5C – R.S.: 3,5:1)

Amostras	5A		5B		5C	
	1,5:1		2,5:1		3,5:1	
Razão de sopro	1,5:1		2,5:1		3,5:1	
Direção da amostra	DM	DT	DM	DT	DM	DT
Tensão na ruptura(MPa)	37	26	41	42	39	42
Deformação na ruptura (%)	137	157	191	225	228	233
Tensão no escoamento (MPa)	39	28	48	49	40	47
Deformação no escoamento (%)	6	2	4	3	6	3
Módulo de elasticidade (MPa) *	787	784	944	1130	992	1190

\* velocidade de 500 mm/min.

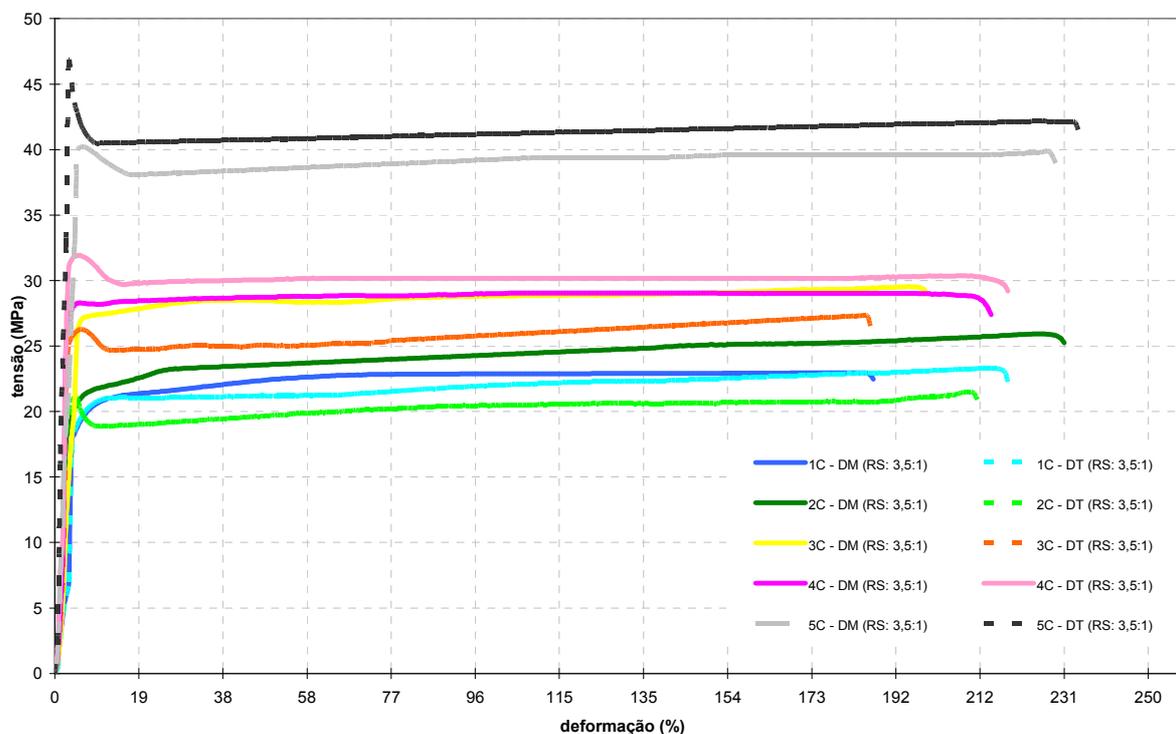
Na Tabela 22 são apresentados os valores de tensão de ruptura, deformação na ruptura e módulo, e na Figura 64 apresentadas as curvas de tensão versus deformação em função da formulação utilizada, sempre na razão de sopro de 3,5:1 a fim de oferecer comparativo entre as formulações utilizadas. Observa-se para os módulos de elasticidade, para as tensões de ruptura e para as deformações na ruptura, que os maiores valores são os da formulação de PEAD puro, enquanto que os menores valores são os do PEBD puro e

os da blendas PEBD/PEAD 75/25. Em valores intermediários se encontram os das blendas de PEBD/PEAD 50/50, e de PEBD/PEAD 25/75, sendo os desta última os mais homogêneos.

**Tabela 22.** Dados de resistência à tração na ruptura, alongamento de ruptura e módulo de todas as formulações dos filmes processados, sempre na R.S.: 3,5:1

Amostras	1C		2C		3C		4C		5C	
Razão de sopro	3,5:1									
Direção da amostra	DM	DT	DM	DT	DM	DT	DM	DT	DM	DT
Tensão na ruptura(MPa)	23	23	26	21	29	27	29	30	39	42
Deformação na ruptura (%)	185	213	224	209	199	186	212	216	228	233
Tensão no escoamento (MPa)	24	26	22	19	27	25	28	32	40	47
Deformação no escoamento (%)	16	16	9	9	12	12	11	6	6	3
Módulo de elasticidade (MPa) *	278	279	427	444	431	366	780	532	992	1190

\* velocidade de 500 mm/min.



**Figura 64.** Curvas de tração versus deformação de todas as formulações processadas, sempre na R.S.: 3,5:1

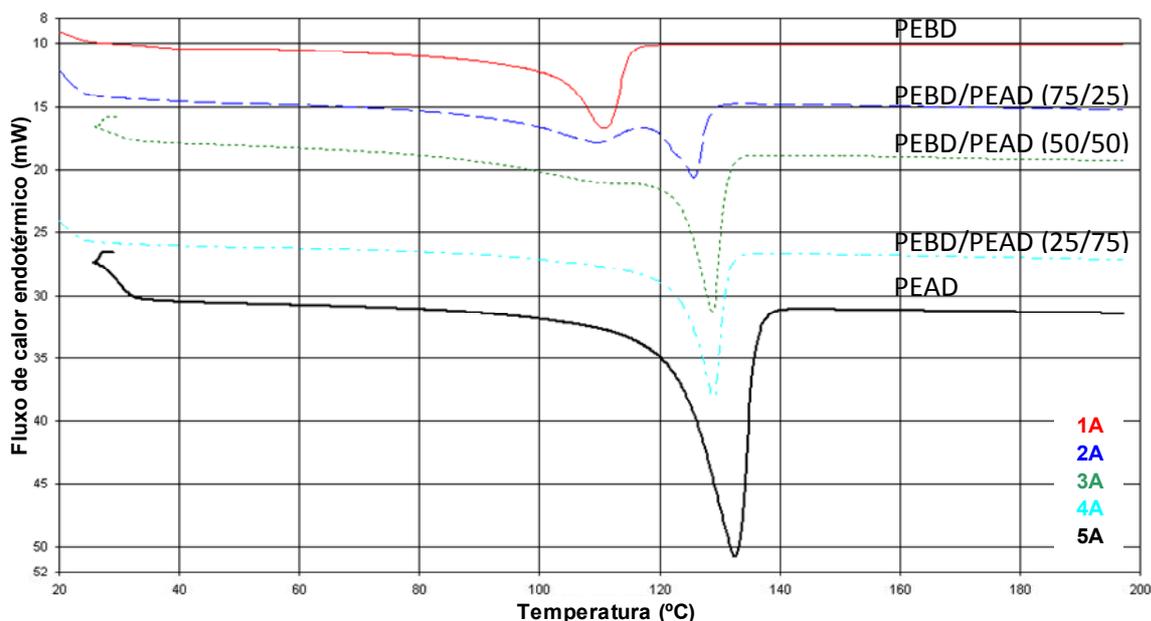
## 5.7. Propriedades Térmicas

### Calorimetria Diferencial Exploratória – DSC

Na Figura 65 são apresentadas as curvas de DSC de todas as amostras de PEBD, PEAD e PEBD/PEAD na R.S. de 1,5:1, onde é possível observar transições de primeira ordem correspondente ao pico endotérmico de fusão dos polímeros semicristalinos (PEBD e PEAD).

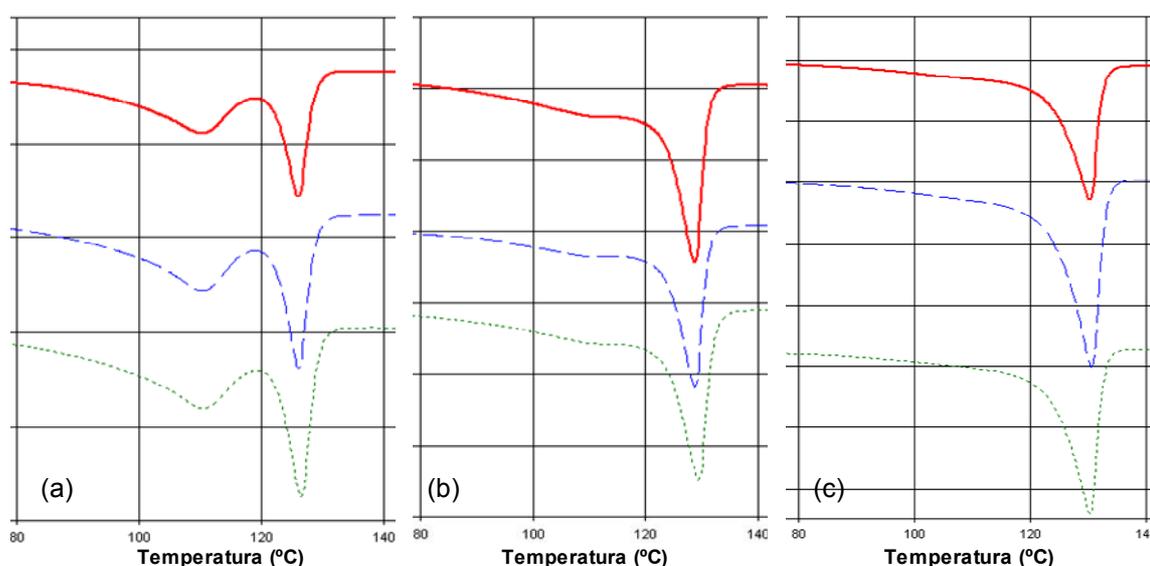
Nas curvas de PEAD e PEBD é observado um pico endotérmico correspondente à fusão do PEBD em 110°C e do PEAD em 132°C. Já nas blends PEBD/PEAD é possível observar a presença de dois picos endotérmicos correspondentes a esses dois polímeros para as composições de 75/25 e 50/50, porém para a composição 25/75 é observado somente um pico endotérmico cuja temperatura é de 129°C muito próximo ao PEAD puro que apresentou a temperatura de fusão de 132°C.

Galante et al. [11], estudaram a blenda PEBDL/PEAD de composição 20/80, onde observaram temperaturas de fusão do PEBDL de 124°C e de 131-132°C para o PEAD, diferenças relatadas como muito pequenas, consistentes com a cinética de cristalização do PEBDL utilizado, com uma distribuição molecular estreita e de aproximadamente o mesmo peso molecular do PEAD; e que certamente ficou ainda mais próximo, em um único pico endotérmico visível à 129°C, na composição 25/75 de PEBD/PEAD, pelas características dos polietilenos utilizados presentemente.



**Figura 65.** Curvas de fluxo de calor versus temperatura dos filmes processados com PEBD, PEAD e das blends PEBD/PEAD com R.S. de 1,5:1.

Na Figura 66 são apresentadas as curvas de DSC das blendas de PEBD/PEAD nas três razões de sopro, onde é possível verificar os dois eventos endotérmicos em cada curva, correspondente a fusão do PEBD em 110°C e do PEAD em 135°C nas blendas 2 (PEBD/PEAD: 75/25) e 3 (PEBD/PEAD: 50/50), sendo mais nítido na Figura 66-a. Já na Figura 66-c, não é possível visualizar o pico correspondente ao PEBD da blenda, o que pode estar indicando que essa composição apresenta compatibilidade por mostrar um pico de fusão maior. Este fato se confirma na literatura [11], como já relatado anteriormente.



**Figura 66.** Curvas de fluxo de calor versus temperatura dos filmes processados com PEBD/PEAD (com RS: 1,5:1; 2,5:1 e 3,5:1) nas composições: (a) 75/25; (b) 50/50 e (c) 25/75.

Na Tabela 23 são apresentados os resultados da análise térmica das curvas de DSC das amostras, correspondentes ao segundo aquecimento. É possível verificar a variação nas temperaturas de fusão ( $T_f$ ) conforme a composição das blendas de PEBD/PEAD, isto é, com o aumento do teor de PEAD na blenda, a temperatura de fusão do PEAD aumenta de 126°C (PEBD/PEAD: 75/25) a 130°C (PEBD/PEAD: 25/75), próximo da sua temperatura de fusão quando puro (132°C). Cabe ressaltar que na composição de 25/75 não é possível distinguir o pico endotérmico correspondente ao PEBD, indicando que nessa composição os polímeros tornam-se compatíveis, portanto, verifica-se que esta foi a melhor formulação dentre todas as blendas, atingindo o objetivo de uma mistura coerente. Por outro lado observou-se que a razão de sopro não influenciou na temperatura de fusão, fato esperado, pois no primeiro aquecimento se apaga a história térmica e o polímero tem o mesmo comportamento para as três condições de razão de sopro.

Novamente, como já relatado anteriormente, em muitas composições de blendas de PEAD com PEBD são observadas cristalizações separadas dos componentes, com dois picos de fusão distintos [15-20]. Por outro lado, blendas de PEAD com PEBD podem apresentar co-cristalização onde os dois polímeros formam cristais isomórficos, ou seja, as cadeias de ambos os polímeros participam da formação do mesmo cristalito [15, 20-21].

Com relação ao grau de cristalinidade ( $X_c$ ), verificam-se os valores baixos e altos dos polímeros puros correspondentes ao PEBD e PEAD respectivamente. Já nas blendas são mostradas a diminuição do  $X_c$  do PEBD e aumento do  $X_c$  de PEAD com o aumento do teor de PEAD na blenda. Estes resultados podem ser melhor visualizados na Figura 67.

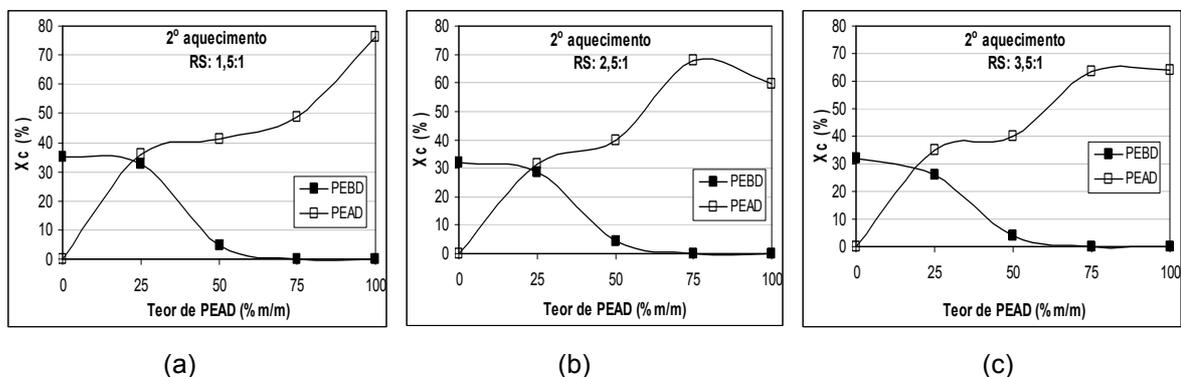
Segundo Peacock [5] polímeros semicristalinos diferem muito de outros sólidos cristalinos devido à possuírem uma larga faixa de temperatura de fusão. Os polietilenos exibem uma característica de faixa de fusão que pode ir de temperaturas um pouco acima da temperatura ambiente até 140°C. A faixa de fusão é consequência da distribuição da espessura das lamelas no estado sólido. Além disso, polietilenos exibem muitas transições secundárias localizadas nas cadeias moleculares cristalinas, desordenadas com as regiões de interface. O PEBD é essencialmente um polímero amorfo, enquanto o PEAD possui cristalinidade bem mais acentuada. As constatações realizadas se confirmam também ao se analisar a literatura [11, 72-74].

**Tabela 23.** Resultados das curvas de DSC das amostras avaliadas.

PEBD/PEAD	Amostras	T <sub>f</sub> PEBD (°C)	T <sub>f</sub> PEAD (°C)	ΔH <sub>f</sub> PEBD (J/g)	ΔH <sub>f</sub> PEAD (J/g)	X <sub>c</sub> PEBD (%)	X <sub>c</sub> PEAD (%)
100/0	1A	111,7		98,9		35	
	1B	111,3		91,1		32	
	1C	111,4		92,6		32	
75/25	2A	110,0	126,1	34,2	26,5	32,6	36,2
	2B	110,3	126,0	30,0	23,2	28,6	31,7
	2C	110,2	126,5	27,1	25,5	25,8	34,8
50/50	3A	108,8	128,8	3,4	60,1	4,8	41,0
	3B	108,8	128,8	3,1	58,1	4,4	39,7
	3C	109,5	129,4	2,8	58,7	4,0	40,1
25/75	4A	130,3		107,2		48,8	
	4B	130,6		149,0		67,8	
	4C	130,3		139,1		63,3	
0/100	5A		132,6		222,9		76
	5B		132,3		174,1		59
	5C		132,6		187,4		64

O grau de cristalinidade do PEAD na blenda com razão de sopro de 1,5:1 da Figura 67-a apresenta 3 estágios, no primeiro, um platô ( $X_c \sim 40\%$ ) entre 25 a 50% de PEAD, no

segundo (entre 50 e 75% de PEAD) observa-se um leve aumento, e acima deste teor o  $X_c$  aumenta exponencialmente atingindo um 78% no PEAD puro.



**Figura 67.** Grau de cristalinidade das amostras de PEBD/PEAD com composições: 75/25; 50/50 e 25/75 com R.S. de: (a) 1,5:1; (b) 2,5:1 e (c) 3,5:1.

Já na Figura 67-b, das amostras com R.S. de 2,5:1, observam-se também 3 estágios, porém após o platô do primeiro estágio, o  $X_c$  teve um aumento pronunciado em 75% de PEAD, para depois no terceiro estágio apresentar uma leve diminuição. Comportamento não esperado, que pode ser devido a que não foi possível distinguir o pico endotérmico de fusão do PEBD. Acredita-se que o valor da entalpia de fusão é o total de ambos componentes da blenda, o que influencia na determinação do cálculo do  $X_c$ .

Na Figura 67-c, correspondente ao  $X_c$  dos filmes com R.S. de 3,5:1, observam-se também 3 estágios, similares ao das amostras de R.S. 2,5:1, porém no terceiro estágio o  $X_c$  apresentou novamente um platô.

Observa-se que a cristalinidade sofreu variações relacionadas às razões de sopro utilizadas, resultado não esperado, tendo em vista que o grau de cristalinidade mostrado na Tabela 23 foi obtido no segundo aquecimento, estando, portanto, já apagadas as histórias térmicas das condições de processamento pelo primeiro aquecimento. Uma explicação possível para estes resultados é que, devido ao processamento em curto período de tempo e de material, para cada formulação e condição de processamento, possa haver ocorrido contaminação entre a troca de formulações e condições de processamento, para as amostras analisadas, ou seja, houve um erro intrínseco experimental que influenciou nestes resultados.

## Termografia

O termovisor Fluke Ti10 é originalmente projetado para solução de problemas diários na manutenção de circuitos e painéis elétricos, sistemas de distribuição de energia elétrica, sistemas de ventilação, sistemas de climatização de ambientes, sistemas de refrigeração e equipamentos a estes associados. Ele auxilia aos técnicos na análise e reparos destes sistemas. Com certeza a utilização incorporada neste trabalho, para acompanhar o processo desde a saída da massa fundida da matriz até um pouco além da linha de névoa, é inovadora e representa um avanço na análise de processos de extrusão.

Algumas vantagens da utilização do termógrafo são:

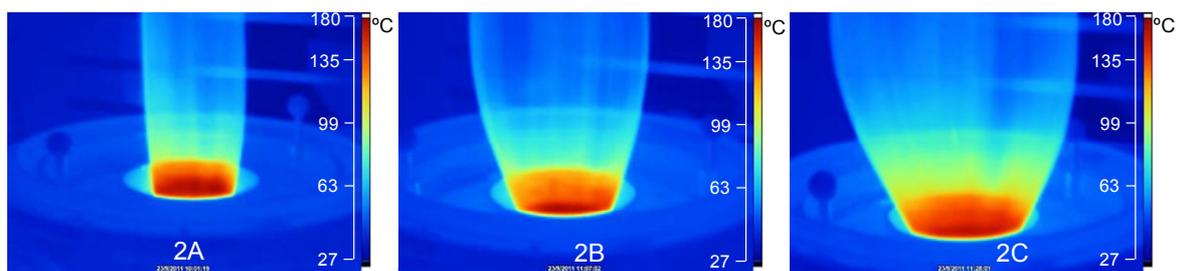
- Permitir a definição exata da altura da linha de névoa, que na maioria das vezes é de difícil visualização a olho nú;
- Facilitar a visualização das diferenças de temperatura captadas no perímetro do balão, correlacionando-as às diferenças de distribuição de espessura. Ou seja, pontos mais quentes são os de maior espessura, e pontos mais frios são os de menor espessura;
- Permitir a percepção das distintas temperaturas da massa fundida de acordo com a formulação utilizada. No caso deste estudo se verifica o aumento da temperatura da massa fundida com o acréscimo de PEAD na formulação. Isto se deve à reologia dos materiais envolvidos, havendo um maior cisalhamento com o acréscimo de PEAD, e o conseqüente aumento da temperatura da massa fundida;
- Leitura e coleta de dados de forma instantânea;
- Possibilidade de tratar os dados posteriormente com um *software* específico, dedicado ao instrumento.

As imagens obtidas com o termógrafo Fluke Ti10, mostradas nas Figuras de 68 a 71, permitem observar o perfil de temperatura do polímero na saída da matriz até a região onde ocorre a sua solidificação (altura da linha de névoa), pela variação de tonalidade de cores, do laranja para o verde. Também se confirma a distribuição distinta entre os processamentos e a variação da espessura em torno do perímetro do filme tubular (aspecto de “dentes de vampiro” na configuração de tonalidades de cores).

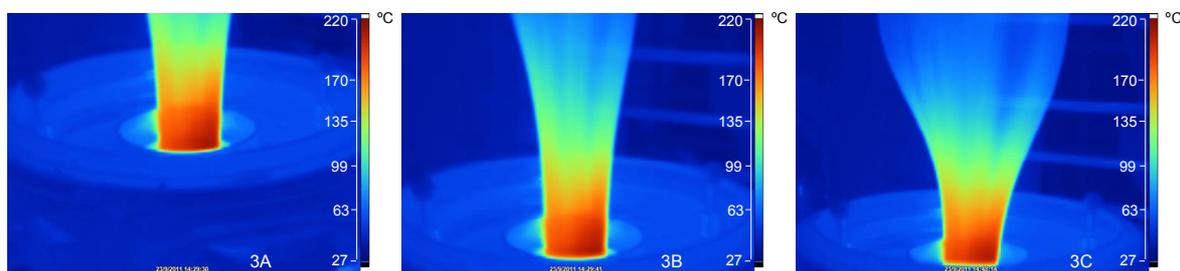
Como já relatado anteriormente, em filmes tubulares, o projeto da matriz e do anel de ar de resfriamento, as características reológicas do polímero utilizado e as condições de processamento, influenciam sobremaneira no comportamento do fluxo do material fundido pela matriz, e a posterior fixação de geometria do filme; sendo extremamente difícil obter-se

um perfil de distribuição de espessura perfeitamente homogêneo e linear. É normal constatar-se o aspecto de “dentes de vampiro”, em pequenas proporções [64-67].

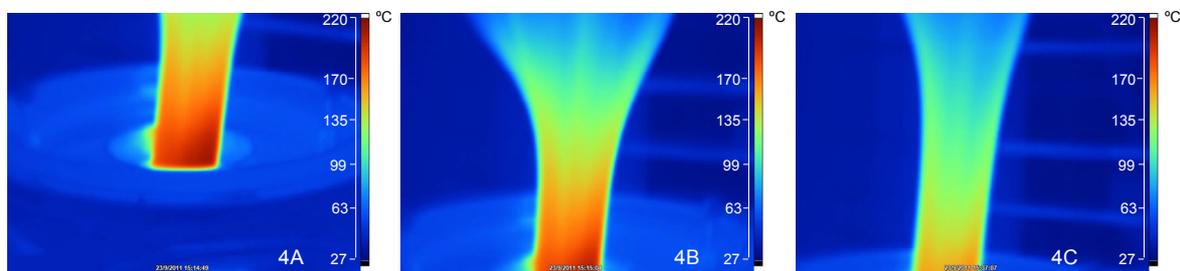
É comum encontrarem-se em aplicações industriais/comerciais equipamentos com problemas de geometria da matriz e/ou com anel de ar que não proporciona a distribuição homogênea do ar de resfriamento no perímetro do filme, o que é o caso também do equipamento utilizado neste trabalho. Além disso, uma maior razão de sopro amplia o problema da má distribuição de espessuras [64-67].



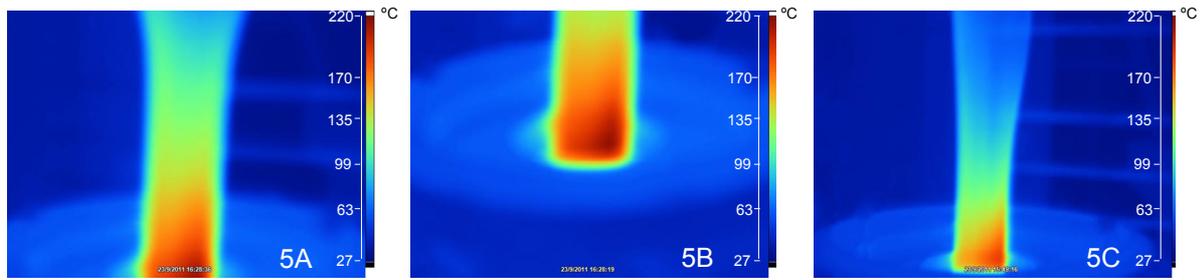
**Figura 68.** Imagens dos filmes tubulares PEBD/PEAD (75/25) com registro das temperaturas após a saída da matriz, - gradientes de vermelho (180°C) ao azul (~ 60°C),  
2A – R.S.: 1,5:1, 2B – R.S.: 2,5:1 e 2C – R.S.: 3,5:1.



**Figura 69.** Imagens dos filmes tubulares PEBD/PEAD (50/50) com registro das temperaturas após a saída da matriz, - gradientes de vermelho (220°C) ao azul (~ 60°C),  
3A – R.S.: 1,5:1, 3B – R.S.: 2,5:1 e 3C – R.S.: 3,5:1.



**Figura 70.** Imagens dos filmes tubulares PEBD/PEAD (25/75) com registro das temperaturas após a saída da matriz, - gradientes de vermelho (220°C) ao azul (~ 60°C),  
4A – R.S.: 1,5:1, 4B – R.S.: 2,5:1 e 4C – R.S.: 3,5:1.

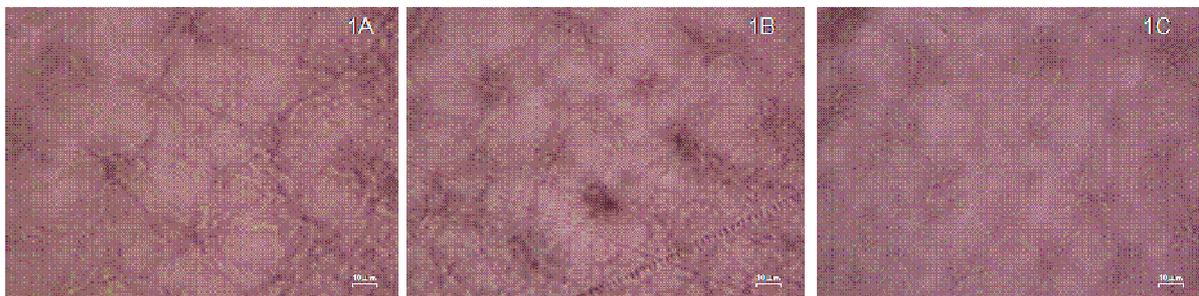


**Figura 71.** Imagens dos filmes tubulares 100% PEAD com registro das temperaturas após a saída da matriz, - gradientes de vermelho (220°C) ao azul (~ 60°C),  
5A – R.S.: 1,5:1, 5B – R.S.: 2,5:1 e 5C – R.S.: 3,5:1.

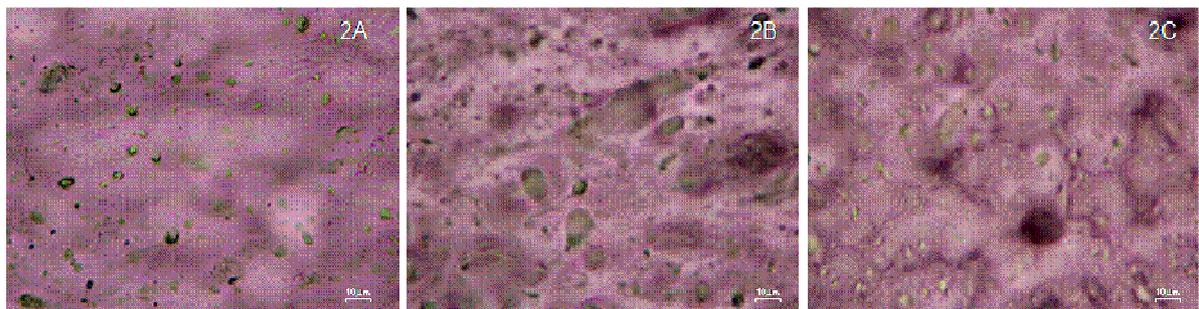
## 5.8. Propriedades Ópticas

### Microscopia Óptica – MO

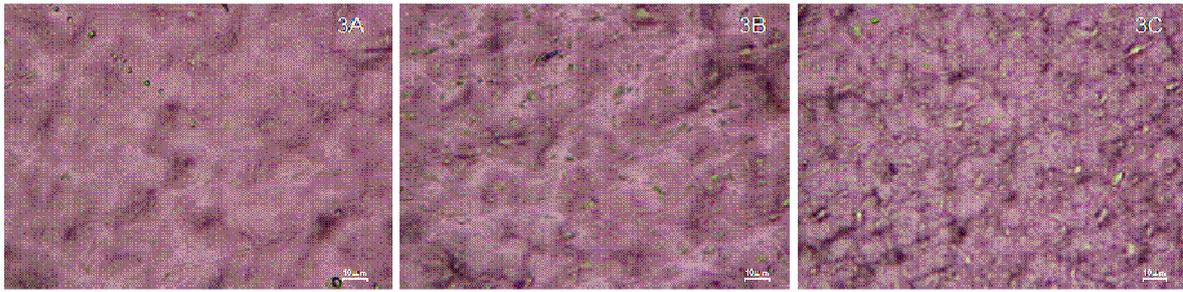
Nas Figuras de 72-76 são apresentadas as imagens das amostras obtidas por microscopia óptica. Observa-se maior homogeneidade dos cristalitos para os filmes com razão de sopro 1,5:1. Observa-se também o aumento no número de cristalitos do PEAD em relação ao PEBD, o que pode estar relacionado com a altura da linha de névoa, que é maior para o PEAD, permitindo que para este haja mais tempo de formação dos cristalitos, e que estes se formem em maior quantidade, de acordo com a literatura [70].



**Figura 72.** Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica:  
1A – R.S.: 1,5:1, 1B – R.S.: 2,5:1 e 1C – R.S.: 3,5:1.



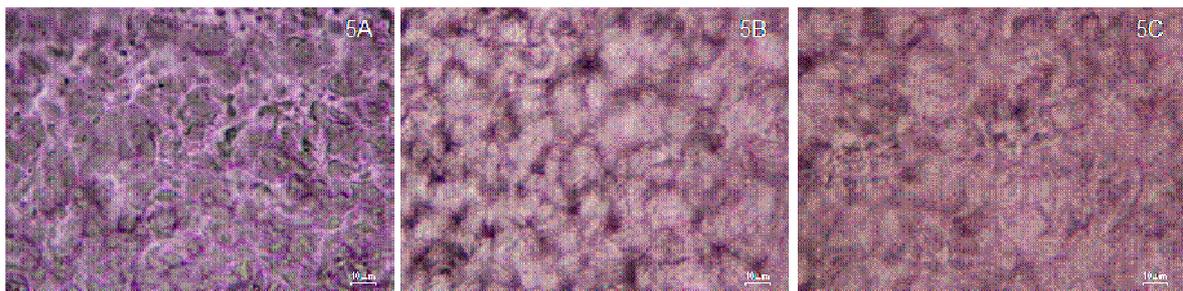
**Figura 73.** Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica:  
2A – R.S.: 1,5:1, 2B – R.S.: 2,5:1 e 2C – R.S.: 3,5:1.



**Figura 74.** Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica:  
3A – R.S.: 1,5:1, 3B – R.S.: 2,5:1 e 3C – R.S.: 3,5:1.



**Figura 75.** Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica:  
4A – R.S.: 1,5:1, 4B – R.S.: 2,5:1 e 4C – R.S.: 3,5:1.



**Figura 76.** Imagens das amostras obtidas por microscopia óptica:  
5A – R.S.: 1,5:1, 5B – R.S.: 2,5:1 e 5C – R.S.: 3,5:1.

### **Colorimetria, Opacidade e Brilho**

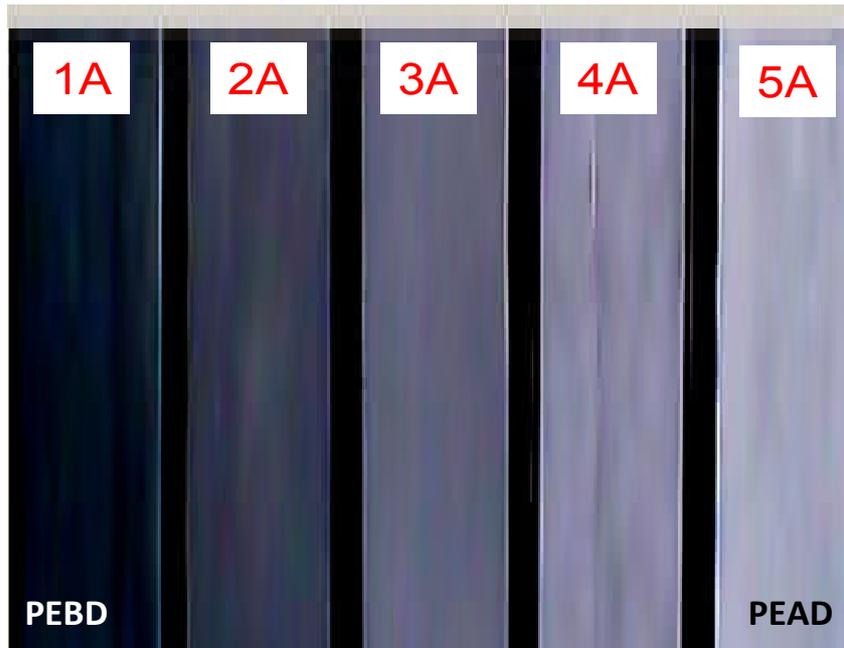
Propriedades óticas (opacidade, brilho e cor) podem nos indicar características intrínsecas do material, relacionadas à cristalinidade ou a topografia da superfície da amostra. O mecanismo de resposta destas propriedades pode ser fundamentado pelo fenômeno físico de absorção e transmissão da luz.

A opacidade é a porcentagem de luz absorvida e/ou refletida por uma amostra de filme. Em geral, a superfície mais lisa reflete mais luz e então se percebe uma maior opacidade. O nível de opacidade percebida não é apenas uma função de reflexão especular (como num espelho), mas também envolve a distribuição e a intensidade da luz refletida [5].

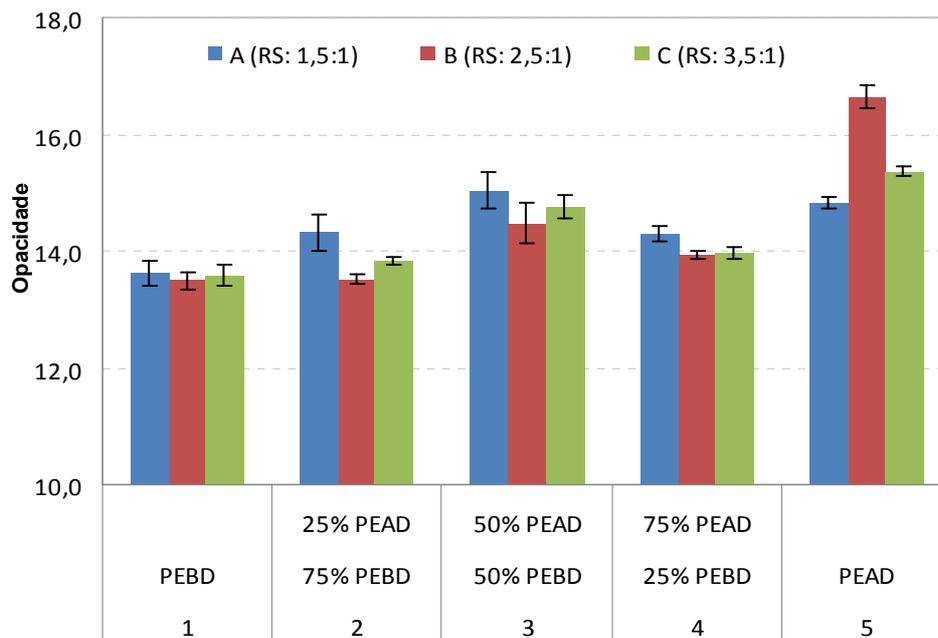
Brilho é a porcentagem de luz transmitida que, passando através da amostra de filme, tem sua trajetória desviada em um determinado ângulo a partir de seu eixo original de transmissão. Uma baixa porcentagem de brilho indica dispersão de luz menor que um alto valor. Dois fenômenos contribuem para o brilho: a luz desviada pelas superfícies interna e externa. A primeira é uma função do índice de refração entre regiões adjacentes dentro da amostra, enquanto a segunda é uma função da rugosidade da superfície. Em geral o brilho interno, e assim o nível de brilho total, aumenta em função da espessura da amostra [5].

Na Figura 77, são mostradas amostras de filmes sobre superfície escura, onde observa-se maior opacidade nos filmes com o incremento do PEAD na composição. Na Figura 78 são mostradas as opacidades médias das amostras nas três razões de sopro, onde observa-se que os filmes de PEAD apresentam opacidades maiores (para as diversas razões de sopro) do que as blendas PEBD/PEAD e PEBD, característica específica de polímeros de alto grau de cristalinidade, resultado que confirma os resultados da análise térmica mostrada na Tabela 18. Também é possível visualizar que a presença do PEBD afeta na queda da opacidade do material, fato que pode estar relacionado com o menor grau de cristalinidade deste, devido ao maior número de ramificações de maior tamanho que distancia as cadeias macromoleculares impedindo o empacotamento delas [5]. Em geral, os materiais com grau de cristalinidade maior, apresentaram opacidade maior, devido a que a transmissão direta da luz através das amostras é dificultada pela formação dos cristais [5]. O comportamento anômalo da amostra de 100% PEAD – 5B, com RS 2,5:1, pode ser atribuído a erro experimental ou imperfeições na superfície do filme [5].

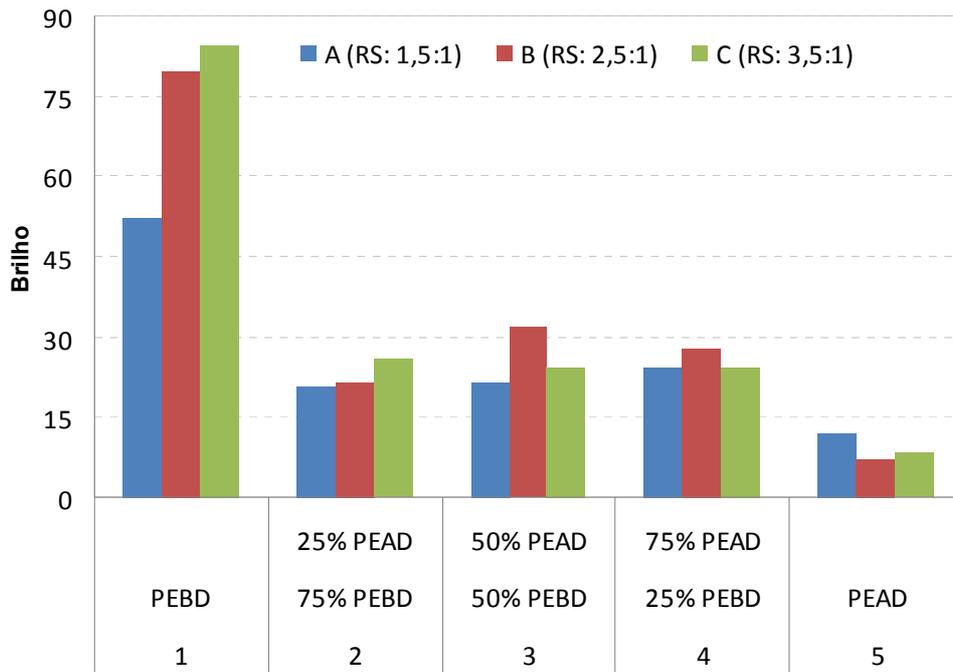
Na Figura 79 são apresentados os resultados do ensaio do brilho, onde os filmes de PEBD apresentam maior valor, porém, na presença e acréscimo da quantidade de PEAD, apresentam uma diminuição do brilho, reafirmando o resultado encontrado para opacidade, isto é, o aumento da cristalinidade. Brilho e opacidade são propriedades que variam de forma inversamente proporcional, como confirmado por Peacock [5]. Ainda, de acordo com Pucci et al. [70], o tamanho dos cristalitos influencia no brilho e na opacidade do material, e, como podemos observar na Figura 77, para os filmes que apresentaram cristalitos maiores, observou-se brilho menor e opacidade maior.



**Figura 77.** Imagem de amostras de filmes nas diferentes composições, com razão de sopro 1.5:1, onde se observa opacidade aumentando com o incremento de PEAD na composição.



**Figura 78.** Opacidade de todos os filmes processados



**Figura 79.** Brilho de todos os filmes processados

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho levaram a concluir:

- Como regra geral observa-se que as razões de sopro maiores possibilitaram maior similaridade das tensões e das deformações no escoamento entre as direções DM e DT;
- A razão de sopro ideal constatada para os filmes processados foi a seguinte para:
  - o PEBD puro o valor deve estar entre 2,5:1 e 3,5:1;
  - a blenda de PEBD/PEAD 75/25 deve estar em um valor entre 2,5:1 e 3,5:1;
  - as blendas de PEBD/PEAD (50/50 e 25/75) deve estar em um valor próximo a 3,5:1;
  - o PEAD puro deve estar em um valor maior e próximo a 3,5:1;
- A composição da blenda PEBD/PEAD (25/75) mostrou compatibilidade e melhor miscibilidade entre ambos os polímeros, confirmado pela análise de DSC;
- Com relação ao grau de cristalinidade ( $X_c$ ), verificam-se os valores baixos e altos dos polímeros puros correspondentes ao PEBD e PEAD respectivamente. Já nas blendas são mostradas a diminuição do  $X_c$  do PEBD e aumento do  $X_c$  de PEAD com o aumento do teor de PEAD na blenda;
- Resultados de microscopia óptica mostraram maior homogeneidade dos cristalitos para os filmes com razão de sopro 1,5:1. Observa-se também o aumento no número de cristalitos do PEAD em relação ao PEBD, o que pode estar relacionado com a altura da linha de névoa, que é maior para o PEAD, permitindo que para este haja mais tempo de formação dos cristalitos, e que estes se formem em maior quantidade;
- Os filmes de PEAD apresentam opacidades maiores, para as diversas razões de sopro, do que as blendas PEBD/PEAD e PEBD, característica específica de polímeros de alto grau de cristalinidade. Também é possível visualizar que a presença do PEBD afeta na queda da opacidade do material, fato que pode estar relacionado com o menor grau de cristalinidade deste;
- Os filmes de PEBD apresentam maior valor de brilho, porém, na presença e acréscimo da quantidade de PEAD, apresentam uma diminuição do brilho, reafirmando o resultado encontrado para opacidade, isto é, o aumento da cristalinidade;
- Finalmente podemos concluir que os resultados obtidos neste estudo foram promissores devido a ampliarem a gama de possibilidades de aplicação destas blendas de acordo com as características desejadas ao produto final.

## 7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este estudo procurou estudar a influência da razão de sopro na estrutura e propriedades de filmes de polietilenos de alto e baixo grau de cristalinidade produzidos pelo processo de extrusão tubular, e com isto ampliar a gama de aplicações de acordo às propriedades dos filmes e composição (blendas) das poliolefinas usadas. Entretanto, tendo em vista às limitações que se apresentaram no processamento, é importante que novos estudos sejam realizados, recomendando-se:

- Planejar maior quantidade de matérias-primas que permita trabalhar por mais tempo em cada processamento, com isto possibilitando que se realize um melhor ajuste da matriz e do anel de ar de resfriamento, para que os filmes tenham uma distribuição mais adequada de espessura. A cada processamento devem ser analisadas amostras de espessuras e realizados os ajustes pertinentes até que se obtenha o padrão pretendido;
- Obter parceria de desenvolvimento com o setor industrial que possibilite processamentos mais adequados à realidade, com tempo de correções e coleta de dados mais confiáveis;
- Avaliar o comportamento reológico do fundido na matriz para verificar a folga adequada da abertura do lábio da matriz tubular;
- Realizar todos os processamentos em uma mesma data de forma a permitir que as condições ambientais e de processamento sejam as mais similares possíveis;
- Programar a disponibilidade de um tripé para fixação da câmera fotográfica e do termovisor sempre em uma mesma posição, desta forma permitindo um comparativo mais adequado entre os processamentos;
- Usar equipamentos que possibilitem uma homogeneidade garantida na mistura das formulações das blendas;
- Utilizar ferramenta de estatística avançada para o planejamento do experimento – DOE.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FIESP; *Análise Setorial de Mercado: Produtos Transformados de Plásticos para o APL Transformador de Plásticos da Região do Grande ABC Paulista*; DECOMTEC – Departamento de Competitividade e Tecnologia; 2009; disponível em: <http://www.fiesp.com.br/competitividade/downloads/an%C3%A1lise%20de%20mercado%20setor%20transformador%20pl%C3%A1sticos.pdf>; acesso em 28 de Julho de 2012.
- [2] Moreira, Cynthia; Fernandes, Eduardo; Gomes, Gabriel; Dvorsak, Peter; Heil, Tatiana e Bastos, Valéria; *Potencial de Investimentos no Setor Petroquímico Brasileiro 2007-2010*; BNDES; 2007; disponível em: [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta\\_Expressa/Tipo/Livro/200706\\_2.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Tipo/Livro/200706_2.html); acesso em 28 de julho de 2012.
- [3] Fleury, Afonso; Fleury, Maria Tereza; *Capacitação competitiva da indústria de transformação de plástico*; Polímeros: Ciência e Tecnologia; São Carlos, v. 10, n. 3, setembro de 2000.
- [4] Gorni, Antonio Augusto; *Pesquisa traça a evolução do parque de máquinas para transformação de plásticos*; Revista Plástico Industrial – 76 – outubro de 2008; disponível em: [http://www.gorni.eng.br/Gorni\\_PI\\_Out2010.pdf](http://www.gorni.eng.br/Gorni_PI_Out2010.pdf); acesso em 28 de julho de 2012.
- [5] Peacock, Andrew J.; *Handbook of Polyethylene – Structures, Properties and Applications*; Marcel Dekker Inc.; 2000; ISBN: 0-8247-9546-6.
- [6] Benham, Elizabeth; MacDaniel, Max; *Ethylene Polymers – HDPE*; Encyclopedia of Polymer Science and Technology; Vol. 2, pgs 382 - 412; 2010.
- [7] Maraschin, Norma; *Ethylene Polymers – LDPE*; Encyclopedia of Polymer Science and Technology; Vol. 2, pgs 412 – 441; 2010.
- [8] Simpson, D.M.; Vaughan, G. A.; *Ethylene Polymers – LLDPE*; Encyclopedia of Polymer Science and Technology; Vol. 2, pgs 441 – 482; 2010.
- [9] Brydson, John Andrew; *Plastics Materials - 7th ed.*; Butterworth-Heinemann; ISBN: 0-7506-4132-0; 1999.
- [10] Mikitaev, Abdulakh K.; Ligidov, Mukhamed Kh.; Zaikov Gennady E.; *Polymers, polymer blends, polymer composites, and filled polymers : synthesis, properties, application*; ISBN: 978-1-60876-238-5 (E-Book); 2006.
- [11] Galante, Maria J.; Mandelkern, Leo; Alamo Rufina G.; *The crystallization of blends of*

- different types of polyethylene: The role of crystallization conditions*; Polymer Vol. 39 No. 21, pp. 5105-5119, 1998.
- [12] Hage Jr., E.; Pessan, L. A.; *Blendas Poliméricas*; Apostila do curso de aperfeiçoamento em plásticos, Módulo 8, São Carlos; 2002.
- [13] Fried, J.; *Polymer Science and Technology*; ed. Prentice Hall PTR; New Jersey; 1995.
- [14] Akcelrud, L.; *Fundamentos da Ciência dos Polímeros*, 1ª Edição; editora Manole; Barueri; 2007.
- [15] Liu, C. Y.; Wang, J.; He, J. S.; *Rheological and Thermal Properties of m-LLDPE blends with m-HDPE and LDPE*; Polymer, vol. 43, p. 3811-3818; 2002.
- [16] Wu, T.; Li, Y.; Wu, G.; *Crystalline Structure and Phase Structure of mLLDPE/LDPE Blends*; Polymer, vol. 46, p. 3472-3480; 2005.
- [17] Arnal, M. L.; Sánchez, J. J.; Muller, A. J.; *Miscibility of Linear and Branched Polyethylene Blends by Thermal Fractionation: Use of Successive Self-Nucleation and Annealing (SSA) Technique*; Polymer, vol. 42, p. 6877-6890; 2001.
- [18] Salazar, J. M.; Cuesta, M. S.; Plans, J.; *On Phase-Separation in High-Density and Low-Density Polyethylene Blends. 1. Melting-Point Depression Analysis*; Polymer, vol. 32, p. 2984-2988; 1991.
- [19] Minick, J.; Moet, A.; Baer, E.; *Morphology of HDPE/LDPE Blends with Different Thermal Histories*; Polymer, vol. 36, p. 1923-1932; 1995.
- [20] Fonseca, C. A.; Harrison, I. R.; *An Investigation of Co-Crystallization in LDPE/HDPE Blends using DSC and TREF*; Thermochemica Acta, vol.313, p. 37-41; 1998.
- [21] Utracki, L. A.; *Polymer Alloys and Blends – Thermodynamics and Rheology*; Hanser Publishers; New York; 1989.
- [22] Elias, H. G.; *An Introduction to Polymer Science*; VCH; Germany; 1997.
- [23] Bever, M. B.; *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*; Pergamon Press; Oxford, Vol. 5; 1986.
- [24] Mark, J. E.; *Physical Properties of Polymers Handbook*; ed. American Institute of Physics; Woodbury; NY; 1996.
- [25] Lo, C.; Seifert, S.; Thiyagarajan, P.; Narasimhan, B.; *Phase Behavior of Semycrystalline Polymer Blends*; Polymer; vol. 45; p. 3671-3679; 2004.
- [26] Paul, D. H.; Sperling, L. H.; *Multicomponent Polymer Materials*; American Chemical

Society; Washington; 1986.

- [27] Fan, Z. G. J.; Williams, M. C.; Choi, P.; A Molecular Dynamics Study of the Effects of Branching Characteristics of LDPE on Its Miscibility with HDPE; *Polymer*; vol. 43; p. 1497-1502; 2002.
- [28] Blass, Arno; *Processamento de Polímeros*; Editora da Universidade Federal de Santa Catarina; 1988.
- [29] Chanda, M.; Roy, S. K.; *Plastic Technology Handbook*; Marcel Dekker Inc., New York; 1987.
- [30] Michaeli, Walter; *Extrusion Dies for Plastics and Rubber, 2nd edition*; Hanser Publishers, 1992.
- [31] Rauwendaal, Chris; *Polymer Extrusion, 4th edition*; Carl Hanser Verlag; 2001.
- [32] Roman, Ademar; *Transformação do Polietileno – PEBD*; Editora Érica Ltda, 1995.
- [33] Harper, Charles A.; *Handbook of Plastic Processes*; Wiley – Interscience; ISBN: 978-0-471-66255-6; 2006.
- [34] Tadmor, Zehev; Gogos, Costas G; *Principles of polymer processing – 2nd ed.*; Wiley – Interscience; ISBN 0-471-38770-3; 2006.
- [35] Cantor, Kirk; *Blown film extrusion: an introduction*; Carl Hanser Verlag; ISBN: 978-1-56990-396-4; 2006.
- [36] Rauwendaal, Chris; *Polymer Mixing, A Self-Study Guide*; Carl Hanser Verlag; Munich; 1998.
- [37] Rauwendaal, Chris; *Understanding Extrusion*; Carl Hanser Verlag; Munich; 1998.
- [38] Rauwendaal, Chris; *Statistical Process Control in Injection Molding and Extrusion*, Carl Hanser Verlag; Munich; 2000.
- [39] Rauwendaal, Chris; Noriega, Pilar; *Troubleshooting the Extrusion Process*; Carl Hanser Verlag; Munich; 2001.
- [40] Rauwendaal, Chris; Cantor, Kirk; *Extrusion Handbook*; Carl Hanser Verlag; Munich; 2001.
- [41] Giles, Harold F.; Wagner, John R.; Mount, Eldridge M.; *Extrusion : the definitive processing guide and handbook*; William Andrew, Inc.; ISBN 0-8155-1473-5; 2005.
- [42] Ulcej, J.; *Flat Sheet and Film Die Operation and Maintenance*; ProCon; Greensboro; NC; October; 1998.

- [43] Sunnerberg, A.; *Advances in Gauge Measurement Techniques for Flat Die Extrusion*; ProCon; Greensboro, March, 1999.
- [44] Embleton, B.; and Axellrod, S.; *On-Line Product Quality Measurement for Continuous Sheet Processes*; 58th ANTEC; Orlando; p. 357; 2000.
- [45] Di Giacomo, J. D.; *Advance Technology – Flame Plasma Surface Treating System*; Flynn Burner Corporation; New Rochelle; NY.
- [46] Cheatham, C. M.; Hansen, M. H.; and Cooper, L. S.; *Surface Characterization of LDPE Extrusion Coating After Flame and Corona Treatments*; Flynn Burner Corporation; New Rochelle; NY.
- [47] Feiertag, B. A.; *Air Entrainment in Plastic Film Handling and Winding—The State of the Art*; ANTEC Conference Proceeding; p. 283; NY; 1999.
- [48] Burmann, George; Fischer, Peter; and Wortberg, Johannes; *Distribuidor circular promove a distribuição de camadas uniformes coextrudadas*; Revista Plástico Industrial – 78 – março de 2012; disponível em: [http://www.arandanet.com.br/midiaonline/plastico\\_industrial/2012/marco/index.html](http://www.arandanet.com.br/midiaonline/plastico_industrial/2012/marco/index.html); acesso em 06 de agosto de 2012.
- [49] Kwack, T. H.; *Processing Variables and the Scaling Parameters in Blown Film Extrusion*. SPE ANTEC, 1999.
- [50] ASTM D6988 – 08: *Standard Guide for Determination of Thickness of Plastic Film Test Specimens*; 2008
- [51] ABNT NBR 15560 - 1: *Filmes Plásticos Agrícolas para Cultivo Protegido – Parte 1: Cobertura de Estufas*, 2008.
- [52] Han Jiang et al; *Influence of surface roughness and contact load on friction coefficient and scratch behavior of thermoplastics olefins*; *Advances in Polymer Technology*, vol. 18, n°2, 171-180, 1999.
- [53] Eng° Pedro Geraldo Machion; Poliolefinas S.A.; *Variação do Coeficiente de Fricção em Filmes de Polietileno*; Plásticos, ago-set 1977.
- [54] ASTM D1894-11e1: *Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting*, 1995.
- [55] ASTM D1238 – 10: *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*, 2010.
- [56] Progelhof, R. C., Throne, J. L.; *Polymer Engineering Principles: Properties, Process*,

- Test for Design*; Hanser: New York, 1993.
- [57] ASTM D3418 – 99: *Standard Test Method for Transition Temperatures of Polymers By Differential Scanning Calorimetry*; 1999.
- [58] Hanamoto, L. S., Felisberti, M. I.; *Cristalização de Polietileno de Baixa Densidade Linear: Fracionamento em Solução por Cristalização Isotérmica*; Instituto de Química, UNICAMP, Campinas, SP; CBPol 159, 2003.
- [59] ASTM E2015 - 04: *Standard Guide for Preparation of Plastics and Polymeric Specimens for Microstructural Examination*; 2009.
- [60] Brydson, J. A.: *Plastics Materials – Seventh Edition*; Butterworth-Heinemann; Woburn; 1999. ISBN - 0 7506 4132 0.
- [61] ASTM D1746 – 03: *Standard Test Method for Transparency of Plastic Sheeting*; 2003.
- [62] ASTM D1003 – 00: *Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics*; 2000.
- [63] ASTM D2457 – 97: *Standard Test Method for Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics*; 1997 .
- [64] Ferreira, R. L. R.; *Assegurando Qualidade na Produção de Geomembranas de PEAD*; Revista Engenharia: São Paulo – SP – Brasil; nº 559 – 137; 2003.
- [65] Ferreira, R.L.R.; Rempel, F.; *Ferramentas da Qualidade Aplicadas para Avaliação da Melhoria da Distribuição de Espessura em Filmes Tubulares*; TCC apresentado, avaliado e aprovado no dia 14 de novembro de 2007, como requisito básico à obtenção do título de Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial, pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas/RS – CEFET/RS - Unidade de Ensino Descentralizada de Sapucaia do Sul; 2007.
- [66] Ferreira, R. L. R.; Giroto, N.; Salles, C. A.; Santana, R. M. C.; *Estudo da Influência da Razão de Sopro na Estrutura e Propriedades de Filmes Tubulares de PEBD*; IX Simpósio Argentino de Polímeros – SAP 2011; Bahía Blanca, Argentina; 2011.
- [67] Ferreira, R. L. R.; Santos, B.; Konarzewski, V. H. C.; Santana, R. M. C.; *Avaliação da Correlação de Estrutura e Propriedades de Filmes Biorientados de PEBD*; VI Congreso Internacional de Materiales - CIM 2011, Bogotá, Colômbia; 2011.
- [68] Willmouth, F.M.; *Transparency, Translucency and Gloss*; Elsevier Applied Science Publishers Ltd., Optical Properties of Polymers, pp. 265-333; 1986.
- [69] White, J. L., Cakmak, M.; *Orientation, crystallization, and haze development in tubular*

- film extrusion*; Advances in Polymer Technology, Vol. 8, NO. 1, pp. 27-61; 1988.
- [70] Pucci, M.S.; Shroff, R.N.; *Correlation of blown film optical properties with resin properties*; Polymer Engineering Science; Vol. 26, No. 8, pp. 569-575; 1986.
- [71] Patel, R. M.; Butler, T. I.; Walton, K. L.; Knight, G. W.; *Investigation of processing structure-properties relationships in polyethylene blown films*; Polymer Engineering & Science; Vol. 34, No.19, pp. 1506–1514; 1994
- [72] Santana, R.M.C.; Manrich, S.; *Filmes Tubulares de Compósitos de Termoplásticos Pós-Consumo*; Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 15, nº 3, pgs. 163-170; 2005.
- [73] Zhang, X.M.; Elkoun, S.; Ajjo, A.; Huneault, M.A.; *Oriented Structure and Anisotropy Properties of Polymer Blow Films: HDPE, LLDPE and LDPE*; Polymer, 45, pgs. 217-229; 2004.
- [74] Zhu, L.; *Thermal Analysis of Polymer Films*; Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 3: Applications to Polymer and Plastics, Chapter 10; 2002.
- [75] ASTM D882 - 09: *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastics Sheeting*; 2009.
- [76] Shastri R.; *Modern Plastics Handbook – Chapter 11 – Plastics Testing*; Modern Plastics and Charles A. Harper - Technology Seminars, Inc. - McGraw-Hill; Maryland; ISBN – 0-0702-6714-6; 2000.