



---

## SUMÁRIO

### 14652 - ANÁLISE DO PROCESSO DE CO-EXTRUSÃO NA PRODUÇÃO DE CHAPAS TERMOPLÁSTICAS

Josué Alberton<sup>1</sup>, Julia Alberton<sup>2</sup>, Mario Sérgio Bortolatto<sup>1</sup> .....

## Trabalho Completo de Pesquisa

### 14652 - ANÁLISE DO PROCESSO DE CO-EXTRUSÃO NA PRODUÇÃO DE CHAPAS TERMOPLÁSTICAS

Josué Alberton<sup>1</sup>, Julia Alberton<sup>2</sup>, Mario Sérgio Bortolatto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário Barriga Verde. Rua Pe. João Leonir Dall'Alba, s/n, Murialdo, 88870000, Orleans, SC - Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n - Trindade, 88040-900, Florianópolis, SC - Brasil

**Resumo:** O controle dos parâmetros do processo de produção é um dos fatores que contribuem com o aumento da produtividade e também, com a redução da quantidade de material reprocessado na transformação de materiais poliméricos. Para que o processo de co-extrusão de chapas termoplásticas apresente bons resultados é necessário estudar o sistema produtivo. Recentemente, pôde-se observar em algumas unidades industriais da região sul do estado de Santa Catarina um aumento significativo de material reprocessado. Encontrar alternativas para diminuir os desperdícios ou solucionar o problema pode contribuir com a redução dos custos dos produtos devido à um processo mais eficiente. Este trabalho apresenta como objetivo realizar a análise do processo de co-extrusão na produção de chapas termoplásticas. O experimento foi realizado em escala industrial. As chapas termoplásticas foram produzidas com polipropileno. O processo de moldagem por co-extrusão utilizado nos experimentos apresentou três extrusoras. A produtividade da extrusora foi calculada pelo fluxo de arraste menos o fluxo de pressão. No balanço energético foi calculado o rendimento térmico global da co-extrusora. Na análise da superfície da chapa termoplástica co-extrudada foi utilizado o MEV. Os resultados obtidos mostraram que a co-extrusora apresentou produtividade de 960,26 kg/h com rendimento térmico global de 44 %. Na morfologia da superfície da chapa termoplástica foi observado adesão interfacial entre as camadas dos fluxos A, B e C do processo de co-extrusão. Sugere-se que o controle adequado dos parâmetros do processo de co-extrusão possa contribuir para o aumento da produtividade de chapas planas e reduzir a quantidade de material reprocessado.

**Palavras-chave:** chapas termoplásticas, co-extrusão, processo de produção.

## INTRODUÇÃO

O controle dos parâmetros do processo de produção é um dos fatores que contribuem com o aumento da produtividade e também, com a redução da quantidade de material reprocessado na transformação de materiais poliméricos.

Os plásticos de interesse industrial são geralmente de origem sintética. As características mecânicas dos plásticos são intermediárias entre os valores correspondentes às da borracha e às fibras. O Polipropileno, por exemplo, é um dos



plásticos de maior comercialização devido à excepcionais propriedades e versatilidade de aplicação e uso (MANO E MENDES, 1999).

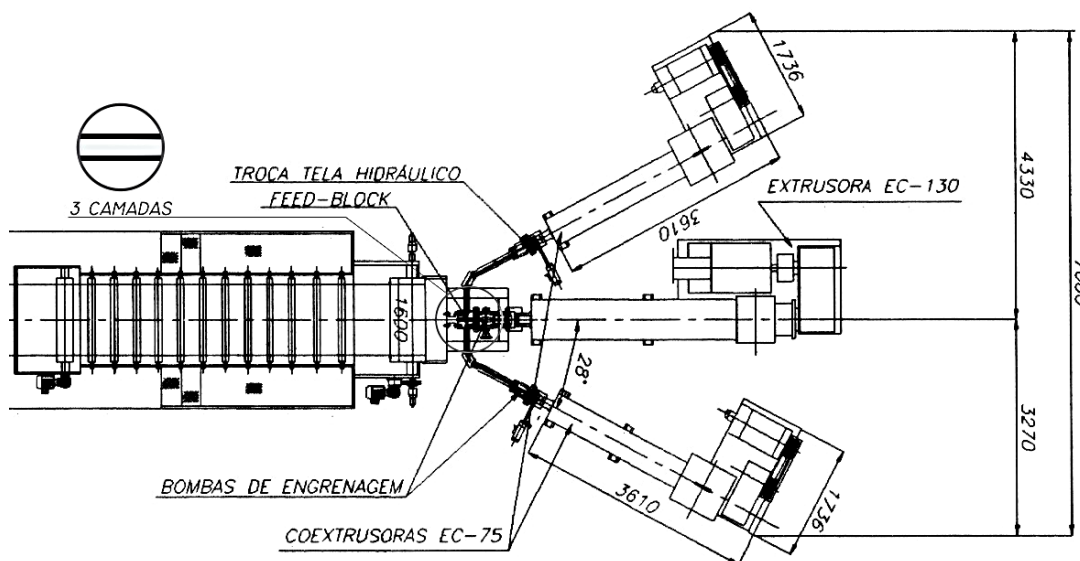
Um polímero mantido a temperatura suficientemente baixa, é relativamente rígido, não apresentando qualquer mobilidade de suas moléculas. As regiões amorfas, nessas circunstâncias, se comportam mais ou menos como o vidro. Aumentando-se progressivamente a temperatura, passa-se por uma região de transição  $T_g$  (*glass transition temperature*) onde as cadeias moleculares das regiões amorfas se afastam e adquirem, aos poucos, mobilidade. O material passa a comportar-se como um fluido cada vez menos viscoso. Com o aquecimento, atinge-se a temperatura de fusão cristalina  $T_m$  (*melt temperature*) em que desaparecem as regiões cristalinas, e o material passa a comportar-se mais ou menos como um líquido viscoso, podendo ser moldado. Mas se o aquecimento prosseguir, atinge-se a temperatura de degradação do polímero, ocorrendo a decomposição do material (BLASS, 1988).

O processo de moldagem por extrusão é usado tanto para a confecção de produtos acabados (barras, perfis, tubos) e principalmente, para a produção de semimanufaturados (chapas termoplásticas), que são submetidas novamente ao processamento para obtenção dos produtos (BLASS, 1988). Os principais equipamentos que constituem uma extrusora são: motor, estrutura e painel de comando, canhão, rosca, placa perfurada (porta-telas), matriz, calandras, esteiras, rolos puxadores e bobinadeiras (HARADA, 2001).

Nos últimos anos, o processo de co-extrusão desenvolveu-se por apresentar vantagens econômicas. A co-extrusão consiste na extrusão simultânea de um produto de camada múltipla pela combinação de várias camadas de materiais. A co-extrusão pode envolver dois ou mais materiais da mesma família tendo diferentes colorações ou polímeros totalmente distintos. A principal vantagem é a possibilidade de combinar as diferentes propriedades dos materiais, como resistência química, a-toxidade, rigidez, brilho, cor, entre outros. A desvantagem é produzir camadas uniformes de materiais com grandes diferenças de viscosidades, pois a camada de baixa viscosidade tende a ser forçada em direção às extremidades da matriz. Esse problema pode ser corrigido através do acerto da temperatura de plastificação das camadas assim que as viscosidades dos materiais se aproximem. Normalmente se fala em extrusora principal e lateral porque as alimentações laterais são camadas adicionais e mais finas que a camada principal (HARADA, 2001).

O processo de co-extrusão corresponde à extrusão simultânea de dois ou mais materiais saindo de uma só matriz com extrusoras independentes para cada camada formada conforme mostra a figura 1. Através do tubo de distribuição único, a combinação das camadas é realizada antes da matriz e os vários materiais fluem em uma camada múltipla definida (PROGELHOF; THRONE, 1993). Os canhões podem ser posicionados em diferentes ângulos e unidos com diversos adaptadores por duas ou mais extrusoras em uma única matriz (BELOFSKY, 1995).

**Figura 1** - Produção de chapas termoplásticas via co-extrusão.



Fonte: Adaptado de Rulli Standard (2005).

Para que o processo de co-extrusão de chapas termoplásticas apresente bons resultados é necessário estudar o sistema produtivo. Recentemente, pôde-se observar em algumas unidades industriais da região sul do estado de Santa Catarina um aumento significativo de material reprocessado. Encontrar alternativas para diminuir os desperdícios ou solucionar o problema pode contribuir com a redução dos custos dos produtos devido à um processo mais eficiente. O objetivo deste trabalho foi realizar a análise do processo de co-extrusão na produção de chapas termoplásticas.

## Metodologia

O experimento foi realizado em escala industrial. As chapas termoplásticas foram produzidas com o polímero polipropileno, sendo adicionado aproximadamente 3%

de pigmento na formulação para diferenciar os fluxos das extrusoras A, B e C no processo de co-extrusão.

O sistema de co-extrusão utilizado nos experimentos foi o equipamento para a produção de chapas planas da marca Rulli Standard. De acordo com informações do fabricante de máquinas Rulli Standard (2005), a linha de co-extrusão é composta por 1 extrusora com  $\emptyset$  da rosca de 130 mm e 2 extrusoras com  $\emptyset$  da rosca de 75 mm. As potências do motor das extrusoras são respectivamente, 300 HP e 125 HP, com potência total instalada de 780 kW. As três extrusoras são acionadas por motor de corrente contínua e o restante da linha através de motores de corrente alternada, com inversores de frequência.

As roscas foram fabricadas com aço nitretado e retificadas, com relação  $L/D$  1:34, resultando melhor homogeneização da matéria-prima processada. A matriz utilizada foi do tipo *flat-die* com largura de 1600 mm. As calandras, com saída por cima, são compostas com cilindros bimetálicos e motor individual. A pressão dos cilindros foi realizada utilizando-se 4 pistões hidráulicos. Utilizou-se água em circuito fechado no resfriamento dos cilindros. A linha é composta de puxadores e bobinadeiras com motor individual para cada fuso, com eixo porta bobina pneumático.

A velocidade de rotação da rosca, elevação de temperatura do material, pressão na seção de plastificação e potência elétrica consumida foram medidos por meio de equipamentos específicos, acoplados diretamente ao canhão das extrusoras e com resposta imediata localizada no painel de controle da linha de co-extrusão. A temperatura da água para resfriamento das chapas foi medida nas três calandras localizadas no equipamento.

Os valores da viscosidade do polipropileno foram obtidos a partir de estudos experimentais realizados por Souza e Demarquette (2001, p. 203), conforme mostra a tabela 1.

**Tabela 1** - Viscosidade do polipropileno com a temperatura.

Temperatura (°C)	Viscosidade (Pa-s)
180	27.000
200	17.200
220	10.700

Fonte: Souza e Demarquette (2001, p. 203).

O calor específico, massa molar, faixa de fusão e densidade do polipropileno, foram medidos por meio de ensaios experimentais realizados pelo fornecedor do material conforme apresentado na tabela 2.

**Tabela 2** - Propriedades do polipropileno.

Propriedade	Valor	Norma
Calor específico	1,77±0,09 kJ/kg-K	-
Massa molar	340.000 g/mol	-
Faixa de fusão	160 a 175°C	ASTM 3418
Densidade a 25°C	0,905 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D1505
Densidade a 175°C	0,760 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D1505

Fonte: Catálogos de produtos Basell Polyolefins.

A produtividade da extrusora foi calculada pelo fluxo de arraste menos o fluxo de pressão. Representado por  $Q$  a quantidade de material (em volume mássico) a produtividade foi calculada pela equação 1 (HARADA, 2001):

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot h \cdot \sin\phi \cdot \cos\phi}{2} - \frac{\pi \cdot h^3 \cdot D \cdot \sin^2\phi \cdot \Delta p}{12 \cdot \eta \cdot L} \quad (1)$$

Onde:

$D$  = diâmetro interno do canhão;

$N$  = velocidade da rosca;

$h$  = altura do filete na seção de plastificação;

$\phi$  = ângulo da hélice;

$\Delta p$  = diferença de pressão entre dois pontos da seção de plastificação;

$\eta$  = viscosidade efetiva nos canais do parafuso;

$L$  = distância entre dois pontos de pressão na seção de plastificação.

De acordo com Blass (1988, p. 263-270), o aquecimento é responsável pela parcela maior da energia requerida pelo processo. Um balanço energético para toda a co-extrusora foi calculado pela equação 2:

$$z + q = C \cdot Q \cdot \Delta T + Q \cdot \Delta p + H \quad (2)$$



Onde:

$z$  = potência mecânica entregue ao parafuso;

$q$  = potência elétrica consumida nos elementos de aquecimento do canhão;

$C$  = calor específico médio do material plástico;

$Q$  = taxa volumétrica de extrusão;

$\Delta T$  = elevação de temperatura do plástico;

$\Delta p$  = diferença de pressão entre dois pontos da seção de plastificação;

$H$  = taxa de dissipação de calor por radiação e condução.

O conteúdo calorífico (entalpia) do material extrudado é uma medida do trabalho útil realizado e se relacionado com a quantidade total de energia dissipada no processo, dá uma indicação do rendimento térmico global de uma extrusora. No balanço energético, o rendimento térmico global de uma extrusora se situa, normalmente, na faixa dos 38 aos 53 % (BLASS, 1988).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é geralmente utilizada para a análise das estruturas superficiais ou subsuperficiais das amostras. A SEM como também é conhecida, produz imagens tridimensionais e de alta resolução (CANEVAROLO Jr., 2004). O microscópio eletrônico de varredura utilizado nos experimentos foi o modelo XL 30 da marca Philips.

## Resultados e discussão

O processo de moldagem por co-extrusão utilizado nos experimentos apresentou três extrusoras (A, B e C). Os resultados obtidos das dimensões geométricas da co-extrusora e os demais parâmetros controlados no processo estão apresentados na tabela 3.

**Tabela 3** - Parâmetros de controle das extrusoras A, B e C.

Propriedade medida	Extrusora		
	A	B	C
Diâmetro interno do canhão	130±0,02 mm	75±0,02 mm	75±0,02 mm
Velocidade da rosca	110±2,0 rpm	110 rpm	120 rpm
Altura do filete na seção de plastificação	8,38 mm	4,84 mm	4,84 mm
Ângulo da hélice	17° 30'	17° 30'	17° 30'

Diferença de pressão entre dois pontos da seção de plastificação	7,8±1,0 MPa	7,0±1,0 MPa	14,0±1,0 MPa
Distância entre dois pontos de pressão na seção de plastificação	35 mm	20 mm	20 mm
Potência elétrica consumida nos elementos de aquecimento-canhão	80±1,0 kW	28±1,0 kW	28±1,0 kW
Elevação de temperatura do plástico	228±2,0 °C	229±2,0 °C	229±2,0 °C

Fonte: Autor, (2016).

As dimensões da rosca e extrusora foram específicas para o processamento do polipropileno, permitindo elevada produtividade da chapa plana.

A velocidade de rotação da rosca, elevação de temperatura do material, pressão na seção de plastificação e potência elétrica consumida foram medidas utilizadas para os cálculos do balanço de massa e energia no equipamento.

A temperatura da água nas três calandras da linha de co-extrusão foram medidas para controlar o resfriamento, conforme apresentado na tabela 4.

**Tabela 4** - Temperatura das calandras.

Calandras	Temperatura (°C)
Superior	28 ± 3,0
Intermediária	30 ± 3,0
Inferior	29 ± 3,0

Fonte: Autor, (2016).

Substituindo-se os valores de controle do processo na equação 1, a taxa volumétrica de co-extrusão foi calculada pelo fluxo volumétrico de arraste menos o fluxo volumétrico de pressão para cada extrusora, conforme apresentado na tabela 5.

**Tabela 5** - Taxa volumétrica de co-extrusão (em volume mássico).

Extrusora	Fluxo de arraste (mm <sup>3</sup> /s)	Fluxo de pressão (mm <sup>3</sup> /s)	Taxa volumétrica de extrusão (mm <sup>3</sup> /s)
A	3,68 . 10 <sup>5</sup>	3,77 . 10 <sup>4</sup>	3,30 . 10 <sup>5</sup>
B	7,07 . 10 <sup>4</sup>	6,58 . 10 <sup>3</sup>	6,41 . 10 <sup>4</sup>
C	7,71 . 10 <sup>4</sup>	1,32 . 10 <sup>4</sup>	6,39 . 10 <sup>4</sup>
A + B + C			4,58 . 10 <sup>5</sup>

Fonte: Autor, (2016).



O fluxo volumétrico de arraste foi fortemente influenciado pela geometria e velocidade da rosca das extrusoras. Os resultados mostraram como a geometria da extrusora A exerce maior influência no fluxo de arraste quando comparado com as extrusoras B e C.

No cálculo do fluxo volumétrico de pressão, utilizou-se a viscosidade de 10.700 Pa-s, pois a partir dessa faixa, o polipropileno fundido passa a se comportar como um líquido viscoso e as moléculas já adquiriram mobilidade suficiente para a moldagem.

A necessidade de processamento do polipropileno com temperatura média de 228°C está relacionada provavelmente a rigidez dos segmentos na cadeia polimérica ou a resistência das forças intermoleculares.

A pressão na seção de plastificação foi um parâmetro controlado, pois o aumento da pressão nas extrusoras indica a presença de impurezas, elevando o fluxo volumétrico de pressão e, conseqüentemente, diminuindo a produtividade.

O balanço de massa para a co-extrusora é apresentado na tabela 6. Com produtividade de 692,68 kg/h a extrusora A foi responsável pela maior parcela da produtividade de chapas termoplásticas.

**Tabela 6** - Balanço de massa.

Extrusora	Produtividade (kg/h)	Produtividade (%)
A	692,68	72,135
B	134,00	13,955
C	133,58	13,911
Balanço de massa para a co-extrusora	960,26	100,00

Fonte: Autor, (2016).

Na determinação do rendimento térmico global da co-extrusora foi necessário calcular inicialmente a taxa de cisalhamento na seção de plastificação e a potência mecânica entregue ao parafuso, conforme apresentado na tabela 7.

**Tabela 7** - Propriedades medidas no balanço de energia.

Extrusora	Taxa de cisalhamento nos canais do parafuso ( $s^{-1}$ )	Potência mecânica entregue ao parafuso (J/s)
A	89,35	$3,15 \cdot 10^2$
B	89,25	$6,12 \cdot 10$
C	97,36	$6,66 \cdot 10$

Fonte: Autor, (2016).

Como o aquecimento é responsável pela parcela maior da energia requerida pelo processo, o balanço energético para toda co-extrusora pôde ser calculado pela equação 2, conforme apresentado na tabela 8.

**Tabela 8** - Balanço de energia.

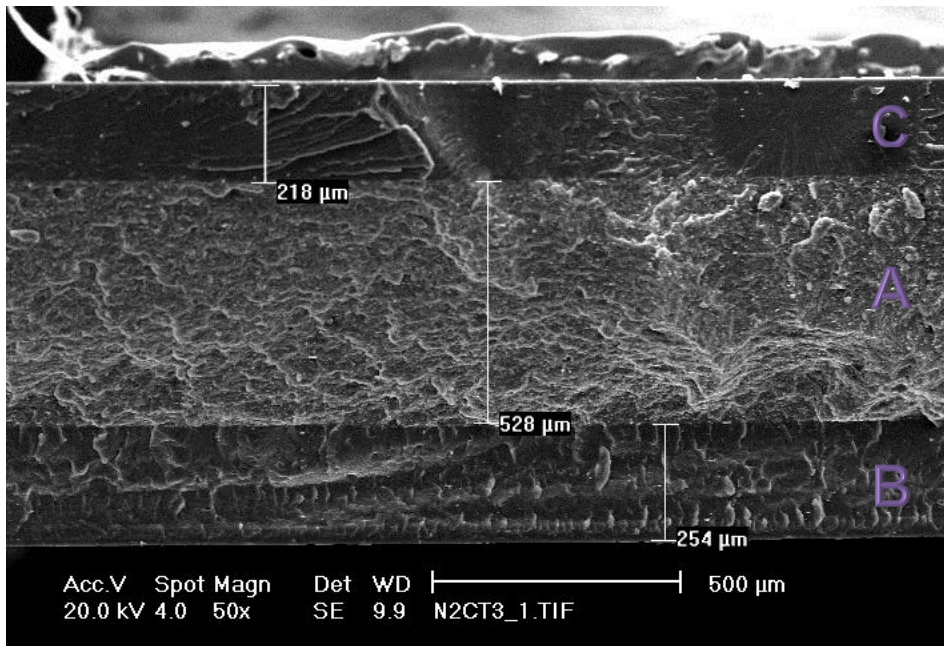
Extrusora	Conteúdo calorífico - Entalpia (J/kg)	Taxa de dissipação de calor (J/kg)
A	$8,87 \cdot 10^5$	( - ) $4,83 \cdot 10^5$
B	$8,89 \cdot 10^5$	( - ) $1,47 \cdot 10^5$
C	$8,89 \cdot 10^5$	( - ) $1,57 \cdot 10^5$

Fonte: Autor, (2016).

Os resultados obtidos mostraram que o rendimento térmico global da co-extrusora foi de aproximadamente 44 %, o que indica que as condições do processo estão adequadas para a produção de chapas termoplásticas, pois de acordo com Blass (1988, p. 263-270), o rendimento térmico de uma extrusora se situa na faixa dos 38 aos 53 %. Os valores calculados nos balanços de massa e energia foram obtidos em regime estacionário do processo de co-extrusão de chapas planas. Em condições estáveis de produção, aproximadamente  $8,05 \pm 1,45$  % foi obtido como retil da chapa termoplástica no processo de co-extrusão.

Na caracterização morfológica da chapa termoplástica produzida via processo de co-extrusão foi analisado o aspecto da superfície de fratura criogênica obtida com  $N_{2(l)}$  conforme apresentado na figura 2. Os resultados obtidos mostraram que a chapa termoplástica apresentou espessura total de  $1000 \mu\text{m}$ , onde  $218 \mu\text{m}$ ,  $528 \mu\text{m}$  e  $254 \mu\text{m}$  corresponderam, respectivamente, aos fluxos das extrusoras C, A e B. A fusão entre os três fluxos das extrusoras ocorreu no dispositivo chamado *feed block*, que distribuiu uniformemente os materiais poliméricos fundidos em um único tubo para produzir a chapa termoplástica. Como nas camadas B e C foi utilizado o mesmo polímero (polipropileno) da camada A, pôde-se observar na co-extrusão adesão interfacial no estado fundido entre as três camadas dos materiais.

**Figura 2** - Morfologia da superfície de fratura da chapa termoplástica.



Fonte: Autor, (2016).

## Conclusão

Na co-extrusão, as dimensões geométricas do equipamento foram consideradas adequadas para atender a produtividade de chapas termoplásticas.

O fluxo de arraste foi influenciado pela geometria e velocidade da rosca das extrusoras. No fluxo volumétrico de pressão, a viscosidade foi relacionada com a temperatura necessária para romper as forças intermoleculares na cadeia polimérica. A pressão da co-extrusora foi controlada para evitar a redução da produtividade.

A co-extrusora apresentou produtividade de 960,26 kg/h com rendimento térmico global de 44 %. Na análise da morfologia da superfície da chapa termoplástica foi observado adesão interfacial satisfatória entre as camadas dos fluxos A, B e C do processo de co-extrusão.

Sugere-se que o controle adequado dos parâmetros do processo de co-extrusão possa contribuir para o aumento da produtividade de chapas planas e reduzir a quantidade de material reprocessado.

## REFERÊNCIAS

BELOFSKY, Harold. **Plastics: product design and process engineering**. New York: Han-ser, 1995. 631 p.



BLASS, A. **Processamento de polímeros**. 2 ed. rev. e ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1988. 313 p.

CANEVAROLO Jr., S. V. (Coord.) **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004. 448 p.

HARADA, J. **Extrusão e termoformagem de PS e ABS – Aspectos teóricos e operacionais e os princípios básicos**. Criciúma: IAP, 2001. 128 p.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 191 p.

PROGELHOF, R. C.; THRONE, J. L. **Polymer engineering principles: properties processes, and tests for design**. Munich: Hanser, 1993. 918 p.

RULLI STANDARD. Alta Tecnologia em Extrusão e Coextrusão. **Divisão Rígidos**. Disponível em: <<http://www.rullistandard.com.br/equipfp.html>> e <<http://www.rullistandard.com.br/equipfp2.html>>. Acesso em: 30 out. 2005.

SOUZA, A. M. C. de; DEMARQUETTE, N. R. Comportamento Viscoelástico Linear e Morfologia de Blendas PP/HDPE. **Polímeros**, São Carlos, v. 11, n. 4, p. 201-212, nov. 2001.