

Estudo do Processamento de Compósitos de Polipropileno/Pó de Madeira em Extrusora de Dupla Rosca Corrotacional

C. A. B. Pereira^{1,2}, J. B. Azevedo³, T. G. Almeida¹, E. L. Canedo^{4*}

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEMat)/UFCG, Campina Grande, PB 58429-900 Brasil

² Bolsista FAPESB, Salvador, BA 41650-010, Brasil.

³ Faculdade de Tecnologia SENAI-CIMATEC, Salvador, BA 41650-010, Brasil.

⁴ Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais UAEMa/UFCG, Campina Grande, PB 58429-900, Brasil.

(Recebido em 16/03/2018; revisado em 16/04/2018; aceito em 10/05/2018)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Compósitos de polipropileno heterofásico de média fluidez e pó de madeira com diferentes teores de carga foram processados em extrusora de dupla rosca corrotacional modular de escala semi-industrial com diferentes condições operacionais. A pressão e a temperatura da massa no cabeçote como funções do tempo, assim como diversos parâmetros do processo (potência, energia específica, etc) foram analisadas em termos da composição e das condições de processamento. A evolução do processo ao longo da extrusora foi observada na rosca retirada do barril. Foi demonstrada a viabilidade do processo, verificando-se, em geral, as tendências esperáveis.

Palavras-chave: Polipropileno; Pó de madeira; Processamento; Extrusão.

Abstract:

Compounds of wood flour with a medium-flow heterophasic polypropylene were processed with different filler loadings in a semi-industrial scale modular twin-screw extruder at different operating conditions. Head pressure and exit temperature were recorded as functions of time, as well as several process parameters (power, specific energy, etc.) were analyzed in terms of the composition and the processing conditions. The evolution of the process along the extruder was observed in the screw withdrawn from the barrel. The feasibility of the process was demonstrated, and the expected trends were – in general – verified.

Keywords: Polypropylene; Wood flour; Processing; Extrusion.

1. Introdução

O desempenho e as propriedades dos materiais dependem de sua estrutura, e as estruturas são determinadas, não apenas por sua composição, mas pelo processamento a que são submetidas [1]. O processamento de polímeros ocorre geralmente no estado fundido, onde os polímeros são submetidos à elevadas temperaturas e tensões, que afetam criticamente a estabilidade, conformação e interações intra e intermoleculares das cadeias poliméricas. No caso de compósitos de matriz polimérica, às considerações anteriores deve-se acrescentar a microestrutura (morfologia) da fase dispersa e as interações carga-matriz. As propriedades de um sistema polimérico não dependem apenas das características intrínsecas do sistema, e da composição, dependem do processo utilizado para preparar o material. Diferentes equipamentos e diferentes condições de processamento originam diferentes materiais. A estrutura e, portanto, as

propriedades dependem do processamento, o que justifica o estudo detalhado do processamento de polímeros.

A extrusora de dupla rosca corrotacional modular é um equipamento padrão utilizado na indústria de processamento de polímeros na preparação de blendas e compósitos poliméricos [2-3]. É importante estudar o processamento em equipamentos semelhantes aos utilizados na indústria, e de tamanho apropriado para scale up dos resultados obtidos à prática industrial.

O polipropileno é uma resina “commodity”, cuja produção e importância tecnológica e comercial supera à de outros polímeros de interesse principalmente acadêmico. O Brasil é um dos maiores produtores de polipropileno do mundo, o maior do hemisfério ocidental e, além disso, esse polímero é produzido principalmente por uma empresa nacional [4], o que justifica o estudo detalhado do processamento de polipropileno em nosso país. Além do polipropileno homopolímero são produzidos comercialmente

*E-mail: ecanedo2004@yahoo.com (E. L. Canedo)

copolímeros de polipropileno e etileno com o intuito de diminuir sua cristalinidade e incrementar sua tenacidade [5-6-7]. O polipropileno heterofásico (“copolímero de impacto”) é um material complexo. Basicamente consiste em uma matriz de homopolímero isotático semicristalino de propileno, com partículas de copolímero amorfo de etileno e propileno (elastômero olefínico termoplástico ou TPO) dispersas na matriz [8]. O teor, composição e tamanho das inclusões de TPO, formadas durante o processo de polimerização determina as propriedades do polipropileno heterofásico. Porém, os produtores da resina nada revelam desses detalhes.

Já a madeira é um material extremamente complexo. As partículas de pó de madeira estão formadas por faces de fibras, células mortas (das que sobra apenas a parede celular) alongadas e ocas, firmemente cimentadas, formam o componente estrutural do tronco das árvores. A parede celular é um complexo compósito de celulose, hemicelulose e lignina. [9-10-11]. O processamento de compostos termoplásticos com fibras naturais é complexo devido à natureza higroscópica e hidrofílica das fibras lignocelulósicas, que tem a tendência em absorver umidade, podendo formar vapores durante o processamento além de agravar a degradação térmica do material celulósico [12-14].

O objetivo deste trabalho é o estudo do processamento de compósitos de matriz termoplástica em uma extrusora de dupla rosca corrotacional modular, utilizando compósitos de polipropileno heterofásico/pó de madeira como exemplo. Os parâmetros de processamento fornecidos pelo sistema de controle do equipamento (pressão e temperatura de descarga, energia específica, etc.) em diferentes condições operacionais (teores de carga, vazões, velocidade das roscas, etc.) são reportados e comparados. O aspecto visual do produto e material dentro da extrusora é apresentado. A presente contribuição *não* inclui o estudo das propriedades dos compósitos produzidos, que serão apresentadas em outros trabalhos, limitando-se apenas a considerar o processamento dos mesmos.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

A matriz utilizada neste trabalho foi o polipropileno (PP), copolímero heterofásico, produzido pela Braskem sob o nome comercial EP 440L fornecido na forma de pellet de cor branca. Algumas propriedades podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do polipropileno (PP) heterofásico EP 440L.

Propriedade	Norma	Valor	
Densidade	ASTM D792	0,895	g/cm ³
Índice de fluidez (230°C/2,16kg)	ASTM D1238	6,0	dg/min
Módulo (secante) de elasticidade em flexão	ASTM D790	1050	MPa
Resistência à tração	ASTM D638	24	MPa

Resistência ao impacto (Izod)	ASTM D256	não quebra	
Temperatura de deflexão térmica	ASTM D648	85	°C

A carga utilizada foi à farinha de madeira, obtida a partir do MDF. Algumas características do pó de madeira estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas do pó de madeira.

Propriedade	Material seco (25°C)
Densidade (g/cm ³)	0,950
Calor específico (J/g°C)	1,36
Condutividade térmica (W/m°C)	0,32

2.2. Metodologia

A matriz de polipropileno (PP) e os compósitos de PP com 10, 20 e 30% (em massa) de pó de madeira, previamente seco em estufa a 80°C por 8 horas, foram preparados em uma extrusora Berstorff de 35 mm de diâmetro e 50 diâmetros de comprimento no SENAI-CIMATEC (Salvador, BA), operada com diferentes perfis de temperatura do barril, velocidades de rotação das roscas e taxas de produção. O barril da extrusora Berstorff ZE-30, com comprimento nominal de 50 diâmetros está configurado com 11 seções de 4 e 6 diâmetros (120 e 180 mm), sendo cada seção (exceto a primeira) uma zona de aquecimento/resfriamento com temperatura controlada. O comprimento total do barril é, portanto, de 1500 mm = 1,5 m; esse é também o comprimento dos eixos e, aproximadamente, das roscas. A zona 12 corresponde ao cabeçote (com temperatura controlada e sensores de pressão e temperatura do fundido). As características geométricas do equipamento são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características geométricas da seção transversal da extrusora.

Diâmetro nominal (D_0)	30,00 mm
Diâmetro da meia câmara	34,50 mm
Distância entre eixos	27,75 mm
Diâmetro máximo da rosca	33,50 mm
Diâmetro mínimo da rosca	20,00 mm
Espessura do gap	0,50 mm
Largura normal do gap	4,65 mm
Profundidade máxima do canal	7,25 mm
Fator de forma da rosca	1,68
Volume livre ($L = 50D_0$)	1295 cm ³

(elemento de transporte padrão de dois filetes)

No presente trabalho o polímero (PP) foi alimentado na seção 1 (*top feed*); nos testes com PP puro os alimentadores secundários foram desativados; nos testes com compósitos, a carga (M) foi alimentada na seção 4 (*side feed*) Em todos os casos as portas de ventilação atmosférica nas seções 4 e 7

ficaram abertas; a porta de vácuo na seção 9 foi desativada em todos os testes.

A alimentação de polímero e cargas é dosada com três alimentadores gravimétricos marca Brabender, dois modelos FW40 para material granulado com capacidade de 10 a 50 kg/h, e um modelo DDSR20 para pó com capacidade de 0,5 a 5 kg/h. Os dosadores, localizados no mezanino, podem ser conectados com mangueiras ao funil de alimentação principal na seção 1 (*top feed*) ou aos alimentadores secundários de dupla rosca (*side feed*) nas seções 4 e 8.

A descarga é feita através de um cabeçote (*head*) formado por três segmentos de 30 mm de comprimento cada um. A geometria interna do primeiro segmento (*adapter*), que inclui sensores para medição da temperatura e pressão do fundido à saída do barril, é desconhecida. O segundo segmento é simplesmente um cone de distribuição a matriz de extrusão (*die*),

que comporta o terceiro segmento. A matriz é formada por 24 orifícios arranjados circularmente, que podem ser habilitados (abertos) ou desabilitados (fechados) à vontade para cada teste. No presente trabalho foram habilitados seis furos na fase inicial (PP) e quatro na fase final (PP e compósitos). Os orifícios de seção circular com 3,5 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento possuem um curto segmento de entrada cônico.

A Figura 1 mostra um esquema da linha de extrusão utilizada. Uma banheira de resfriamento em combinação com um picotador de facas convencional foi utilizado para obter o produto granulado dos testes. A configuração da rosca utilizada é apresentada graficamente na Figura 2 e corresponde à recomendação do fabricante para o processamento de compósitos de poliolefinas e fibras vegetais. A Figura 3 ilustra três tipos de elementos de rosca utilizados neste trabalho.

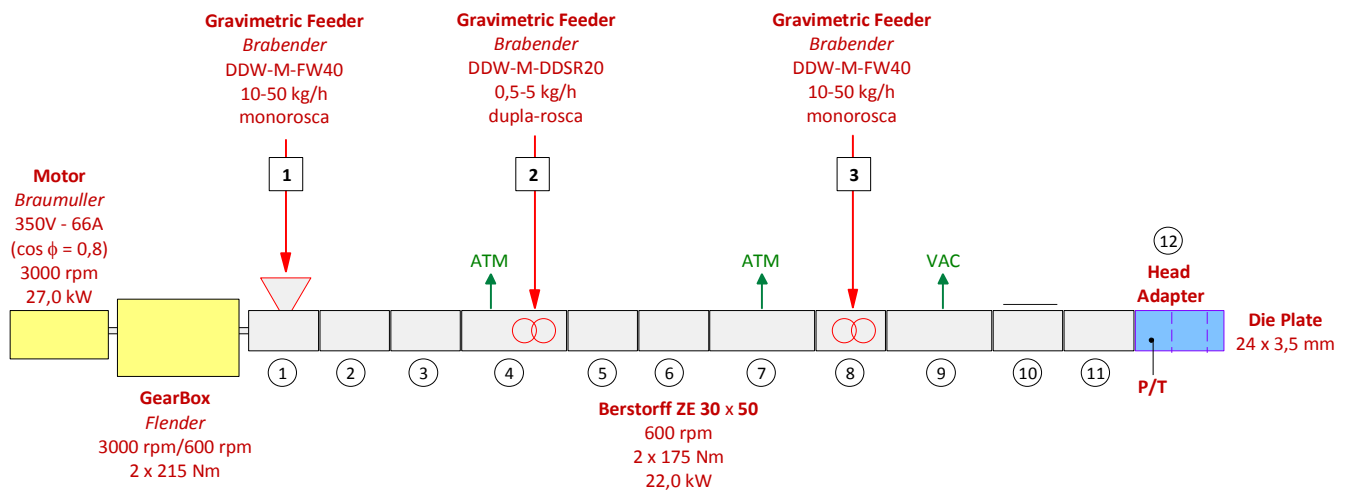


Figura 1 – Esquema da linha de extrusão utilizada neste trabalho (descrição no texto).

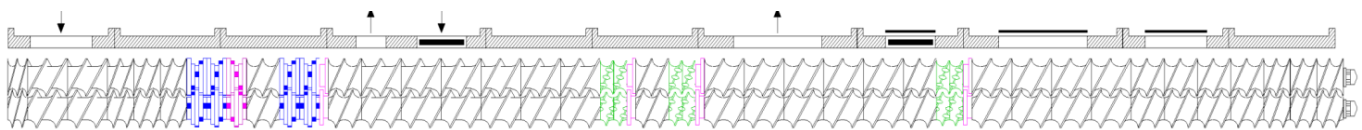


Figura 2 – Configuração da rosca e do barril (descrição no texto).

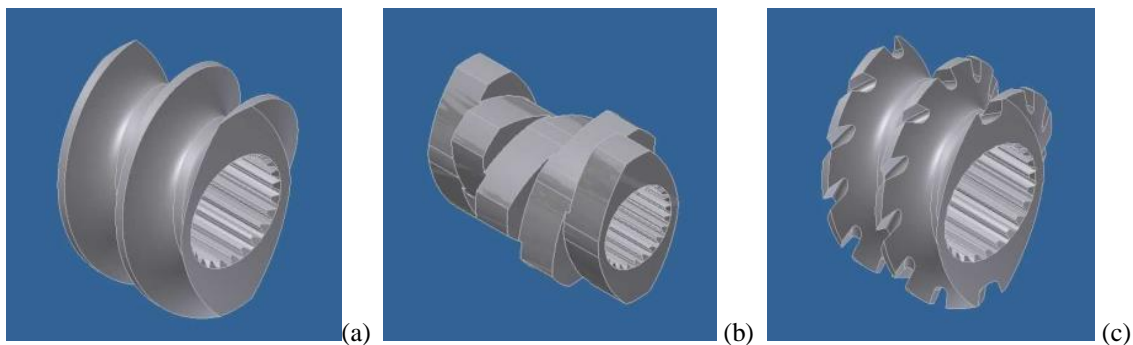


Figura 3 – Elemento de transporte (a), bloco de malaxagem com deslocamento angular 45° (b), elemento de mistura com filetes ranhurados (c).
Fonte: Metalúrgica Escarpa, Novo Hamburgo RS.

Uma peculiaridade das extrusoras de dupla rosca da Berstorff é que o sentido da rotação das roscas é oposto ao adotado pela maioria dos outros provedores desse tipo de equipamento (e.g., Werner & Pfleiderer, Leistritz, etc.). Na Berstorff, os elementos de transporte convencionalmente conhecidos como “L” ou de “passo esquerdo” (*left handed*) arrastam o material em direção à saída e vice versa, os elementos “R” ou de “passo direito” (*right handed*) arrastam o material na direção da alimentação e são, portanto, restritivos do fluxo global na câmara de processamento [15].

O perfil de temperatura fixado para o barril foi mantido em todos testes em 190°C nas zonas 2–3 e 11–12 (Figura 1), e 170°C nas demais. O polímero foi adicionado através do alimentador principal (alimentador 1, seção 1); na preparação de compósitos, a carga (pó de madeira) foi incorporada no alimentador secundário (alimentador 2, seção 4).

Testes com polipropileno (PP) foram extrudados através de matriz com 6 furos, e posteriormente de 4 furos, com a que também foram realizados os testes nos compósitos.

Nos testes com o PP e matriz de 6 furos, a velocidade de rotação das roscas foi variada entre 200, 300 e 400 rpm com uma taxa de alimentação entre 8 e 16 kg/h, de forma a manter uma vazão específica de 0,66 g/volta. Já para os testes com PP com matriz de 4 furos, a velocidade de rotação das roscas foi variada entre 100 e 300 rpm com uma taxa de alimentação constante de 10 kg/h.

Na preparação dos compósitos, com teor de carga entre 10 e 30% utilizando a matriz de 4 furos, a velocidade de rotação das roscas foi variada entre 100 e 300 rpm com uma taxa de alimentação de 10 kg/h.

A Tabela 4 apresenta esquematicamente as condições operacionais utilizadas em todos os testes realizados, junto com a nomenclatura adotada para gráficos e tabelas.

Tabela 4 – Condições operacionais.

#	Teste	Teor de carga (%)	Número de furos	Velocidade das roscas (rpm)	Alimentação (kg/h)
1	PP/200 rpm 6F	0	6	200	8
2	PP/300 rpm 6F	0	6	300	12
3	PP/400 rpm 6F	0	6	400	16
4	PP/100 rpm 4F	0	4	100	10
5	PP/200 rpm 4F	0	4	200	10
6	PP/300 rpm 4F	0	4	300	10
7	PP10/200 rpm 4F	10	4	200	10
8	PP20/200 rpm 4F	20	4	200	10
9	PP30/200 rpm 4F	30	4	200	10
10	PP20/100 rpm 4F	20	4	100	10
11	PP20/300 rpm 4F	20	4	300	10

Além do perfil de temperatura do barril, dentre os parâmetros registrados pelo equipamento extraíram-se alguns, que foram considerados os mais significativos para o processamento, conforme descritos no quadro a seguir:

Taxa de alimentação	G (kg/h)
Velocidade de rotação das roscas	N (rpm)
Taxa específica	Gs (g/volta)
Potência	W (kW)
Energia específica	Es (kWh/kg)
Fração do toque máximo	Z (%)
Temperatura da massa fundida	T (°C)
Pressão do cabeçote	P (bar)

3. Resultados e Discussão

3.1. Extrusão de polipropileno em matriz com 6 furos

A Tabela 5 compara a temperatura fixada no equipamento e a temperatura medida em cada zona de aquecimento na extrusão de polipropileno com uma matriz de 6 furos a diferentes velocidades de rotação. Os resultados estão ilustrados na Figura 4.

Nas zonas 2 a 10 observa-se que a temperatura medida é superior à fixada e que a diferença aumenta com a velocidade de rotação das roscas; porém, nas zonas 11 e 12 se inverte esta tendência, exceto no teste realizado a 400 rpm. Em particular, a temperatura medida na zona 11 (última seção de barril) é significativamente inferior à temperatura fixada nos testes realizados a 200 e 300 rpm.

Tabela 5 – Comparativo da temperatura fixada e da temperatura medida nas zonas de aquecimento na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 furos em diferentes velocidades de rotação.

Zonas	T ₀ (°C)	PP/200 rpm 6F (°C)	ΔT PP/200 rpm 6F	PP/300 rpm 6F (°C)	ΔT PP/300 rpm 6F	PP/400 rpm 6F (°C)	ΔT PP/400 rpm 6F
2	190	190,0	0,0	190,0	0,0	190,0	0,0
3	190	190,0	0,0	190,1	0,1	190,1	0,1
4	170	170,0	0,0	174,0	4,0	175,8	5,8
5	170	170,3	0,3	174,0	4,0	178,4	8,4
6	170	172,5	2,5	179,3	9,3	188,6	18,6
7	170	173,4	3,4	181,9	11,9	194,7	24,7
8	170	170,3	0,3	176,2	6,2	188,8	18,8
9	170	170,1	0,1	177,3	7,3	190,9	20,9
10	170	170,3	0,3	173,6	3,6	185,2	15,2
11	190	175,8	-14,2	185,2	-4,8	199,5	9,5
12	190	192,7	2,7	190,2	0,2	190,6	0,6

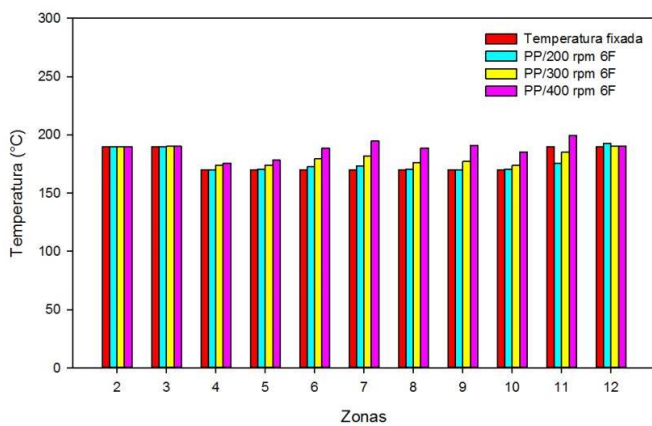


Figura 4 – Comparativo entre a temperatura fixada e a temperatura medida em cada zona na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 furos em diferentes velocidades de rotação.

Valores médios de alguns parâmetros significativos durante 15 min de processamento nas condições indicadas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 furos em diferentes velocidades de rotação.

Parâmetros	PP/200 rpm 6F	PP/300 rpm 6F	PP/400 rpm 6F
G (kg/h)	8,0 ± 0,6	11,9 ± 1,2	16,0 ± 0,7
N (rpm)	200,0 ± 0,1	300,1 ± 0,3	400,1 ± 0,1
Gs (g/volta)	0,666	0,660	0,666
W (kW)	2,7 ± 0,1	4,2 ± 0,1	5,9 ± 0,1
Es (kWh/kg)	0,333 ± 0,029	0,389 ± 0,954	0,368 ± 0,018
Z (%)	30,6 ± 0,8	32,6 ± 1,1	33,9 ± 0,7
T (°C)	195,4 ± 0,4	202,1 ± 1,2	211,7 ± 1,2
P (bar)	27,1 ± 0,9	29,5 ± 1,1	30,3 ± 0,9

O perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 furos em diferentes velocidades de rotação ilustra a tendência de que a maiores velocidades de rotação das roscas a temperatura da massa é mais elevada, como exposto na Figura 5. A 200 rpm a temperatura se manteve aproximadamente estável no tempo, porém a 300 e 400 rpm observa-se um aumento gradual de 5°C durante os 15 minutos de processamento.

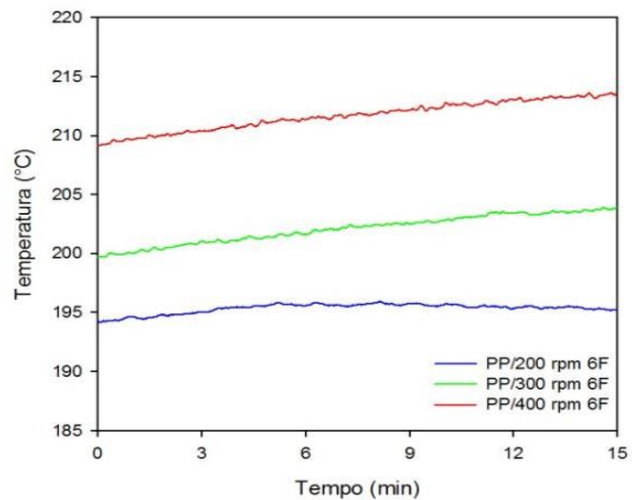


Figura 5 – Perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 furos em diferentes velocidades de rotação.

A Figura 6 mostra o perfil da pressão do cabeçote da extrusora em função do tempo, ilustrando a tendência de maiores pressões quanto maior for à velocidade de rotação. A 200 rpm observa-se um suave aumento da pressão durante o experimento, e a 300 rpm uma queda ligeiramente mais acentuada, já a 400 rpm a variação é desprezível.

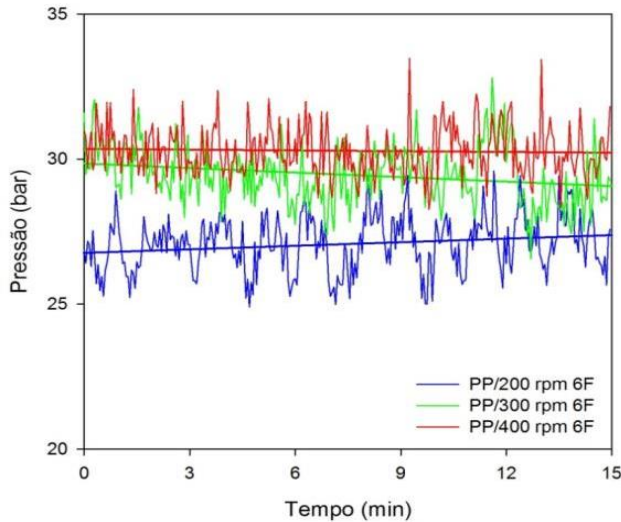


Figura 6 – Perfil da pressão no cabeçote na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 furos em diferentes velocidades de rotação.

3.2. Extrusão de polipropileno em matriz com 4 furos

A Tabela 7 e a Figura 7 apresentam o comparativo entre a temperatura fixada no equipamento e a temperatura medida em cada zona de aquecimento na extrusão de polipropileno por uma matriz de 4 furos a diferentes velocidades de rotação.

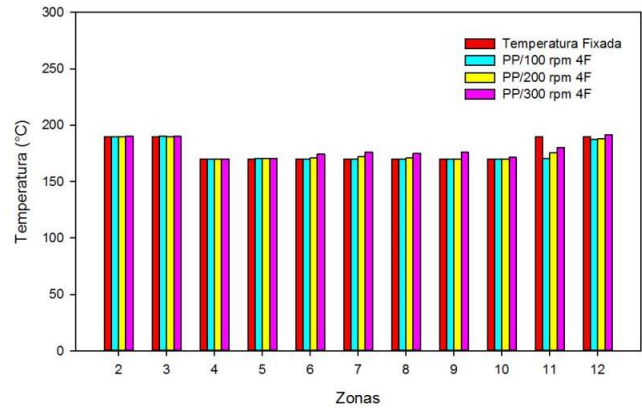


Figura 7 – Comparativo entre a temperatura fixada e a temperatura medida em cada zona na extrusão de polipropileno por uma matriz de 4 furos em diferentes velocidades de rotação

Nas zonas 2 a 10 observa-se que a temperatura medida é superior à fixada e que a diferença aumenta com a velocidade de rotação das roscas; porém, nas zonas 11 e 12 se inverte esta tendência, exceto no teste realizado a 400 rpm. Em particular, a temperatura medida na zona 11 (última seção de barril) é significativamente inferior à temperatura fixada nos testes realizados a 200 e 300 rpm. Valores médios de alguns parâmetros significativos durante 15 min de processamento nas condições indicadas são apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Comparativo da temperatura fixada e da temperatura medida nas zonas de aquecimento na extrusão de polipropileno por uma matriz de 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

Zonas	T ₀ (°C)	PP/100 rpm 4F	ΔT PP/100 rpm 4F	PP/200 rpm 4F	ΔT PP/200 rpm 4F	PP/300 rpm 4F	ΔT PP/300 rpm 4F
2	190	190,0	0,0	190,0	0,0	190,1	0,1
3	190	190,1	0,1	190,0	0,0	190,1	0,1
4	170	170,0	0,0	169,8	-0,2	170,0	0,0
5	170	170,6	0,6	170,2	0,2	170,5	0,5
6	170	169,9	-0,1	170,9	0,9	174,5	4,5
7	170	169,8	-0,2	172,1	2,1	176,2	6,2
8	170	170,1	0,1	171,0	1,0	175,2	5,2
9	170	170,1	0,1	169,9	-0,1	176,0	6,0
10	170	170,0	0,0	170,0	0,0	171,3	1,3
11	190	170,2	-19,8	175,4	-14,6	180,3	-9,7
12	190	187,7	-2,3	188,0	-2,0	191,6	1,6

O perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno por uma matriz de 4 furos em diferentes velocidades de rotação mostra a tendência de que a temperatura da massa é mais elevada quanto maior a velocidade de rotação das roscas, como exposto na Figura 8. A 100 rpm a temperatura teve um declive durante a primeira metade do experimento e elevou suavemente na outra metade. A 200 rpm o inverso acontece: na primeira metade a

temperatura eleva discretamente e na segunda tem uma queda mais acentuada. Já a 300 rpm se nota apenas uma ascendência na temperatura durante o processamento.

Tabela 8 – Parâmetros obtidos na extrusão de polipropileno por uma matriz de 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

Parâmetros	PP/100 rpm 4F	PP/200 rpm 4F	PP/300 rpm 4F
G (kg/h)	10,5 ± 3,2	10,1 ± 1,1	10,1 ± 2,4
N (rpm)	99,8 ± 0,1	199,4 ± 7,0	300,0 ± 0,5
Gs (g/volta)	1,753	0,843	0,560
W (kW)	2,2 ± 0,2	3,2 ± 0,5	4,3 ± 0,3
Es (kWh/kg)	0,208 ± 0,049	0,318 ± 0,080	0,442 ± 0,311
Z (%)	50,2 ± 4,6	36,5 ± 5,7	33,3 ± 2,6
T (°C)	184,9 ± 1,2	193,7 ± 0,9	200,6 ± 0,9
P (bar)	36,3 ± 1,2	30,8 ± 5,0	30,9 ± 2,0

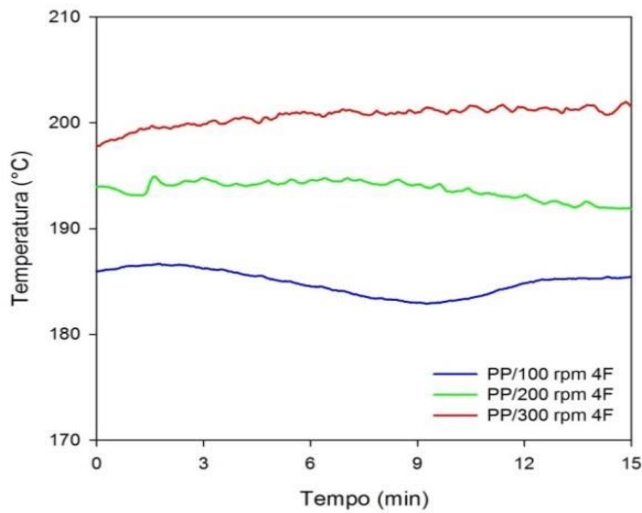


Figura 8 – Perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno por uma matriz de 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

A Figura 9 mostra o perfil da pressão do cabeçote da extrusora em função do tempo, ilustrando a tendência de maiores pressões quanto menor a velocidade de rotação. Nos experimentos percebe-se uma constância nas pressões independente da velocidade de rotação, sendo as pressões a 200 rpm e 300 rpm mais próximas.

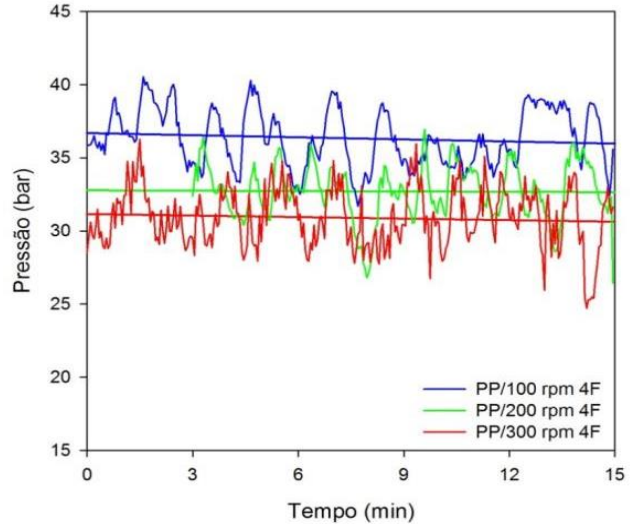


Figura 9 – Perfil da pressão no cabeçote na extrusão de polipropileno por uma matriz de 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

3.3. Comparação entre extrusão de polipropileno em matriz com 6 e 4 furos

A Tabela 9 apresenta o comparativo entre a temperatura fixada no equipamento e a temperatura medida em cada zona de aquecimento na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 e 4 furos a diferentes velocidades de rotação. Os resultados numéricos estão ilustrados na Figura 10.

Tabela 9 – Comparativo da temperatura fixada e da temperatura medida nas zonas de aquecimento na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 e 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

Zonas	T ₀ (°C)	PP/200 rpm 6F (°C)	ΔT PP/200 rpm 6F	PP/300 rpm 6F (°C)	ΔT PP/300 rpm 6F	PP/200 rpm 4F	ΔT PP/200 rpm 4F	PP/300 rpm 4F	ΔT PP/300 rpm 4F
2	190	190,0	0,0	190,0	0,0	190,0	0,0	190,1	0,1
3	190	190,0	0,0	190,1	0,1	190,0	0,0	190,1	0,1
4	170	170,0	0,0	174,0	4,0	169,8	-0,2	170,0	0,0
5	170	170,3	0,3	174,0	4,0	170,2	0,2	170,5	0,5
6	170	172,5	2,5	179,3	9,3	170,9	0,9	174,5	4,5
7	170	173,4	3,4	181,9	11,9	172,1	2,1	176,2	6,2
8	170	170,3	0,3	176,2	6,2	171,0	1,0	175,2	5,2
9	170	170,1	0,1	177,3	7,3	169,9	-0,1	176,0	6,0
10	170	170,3	0,3	173,6	3,6	170,0	0,0	171,3	1,3
11	190	175,8	-14,2	185,2	-4,8	175,4	-14,6	180,3	-9,7
12	190	192,7	2,7	190,2	0,2	188,0	-2,0	191,6	1,6

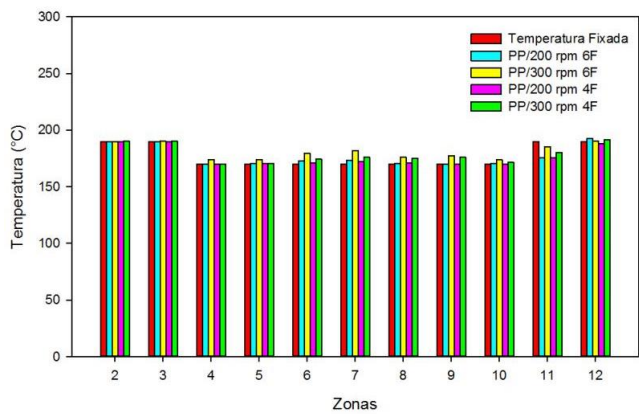


Figura 10 – Comparativo entre a temperatura fixada e a temperatura medida em cada zona na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 e 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

Nas zonas 2 a 10 observa-se que a temperatura medida é preponderantemente superior à fixada, tendo uma leve queda apenas em PP/200 rpm 4F na zona 4, e que a diferença aumenta com a velocidade de rotação das roscas, para ambas as aberturas de matrizes. Porém, na zona 11 em todas as amostras ocorre uma inversão desse padrão, e a temperatura medida é inferior a temperatura fixada, já na zona 12 se inverte esta tendência novamente, exceto no teste realizado a PP/200 rpm 4F, onde a temperatura ainda se mantém inferior. Em particular, a temperatura medida na zona 11 (última seção de barril) é significativamente inferior à temperatura fixada para todos os testes realizados.

Valores médios de alguns parâmetros significativos durante 15 min processamento nas condições indicadas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 e 4 furos em diferentes velocidades de rotação

Parâmetros	PP/200 rpm 6F	PP/300 rpm 6F	PP/200 rpm 4F	PP/300 rpm 4F
G (kg/h)	8,0 ± 0,6	11,9 ± 1,2	10,1 ± 1,1	10,1 ± 2,4
N (rpm)	200,0 ± 0,1	300,1 ± 0,3	199,4 ± 7,0	300,0 ± 0,5
Gs (g/volta)	0,666	0,660	0,843	0,560
W (kW)	2,7 ± 0,1	4,2 ± 0,1	3,2 ± 0,5	4,3 ± 0,3
Es (kWh/kg)	0,333 ± 0,029	0,389 ± 0,954	0,318 ± 0,080	0,442 ± 0,311
Z (%)	30,6 ± 0,8	32,6 ± 1,1	36,5 ± 5,7	33,3 ± 2,6
T (°C)	195,4 ± 0,4	202,1 ± 1,2	193,7 ± 0,9	200,6 ± 0,9
P (bar)	27,1 ± 0,9	29,5 ± 1,1	30,8 ± 5,0	30,9 ± 2,0

O perfil comparativo da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 e 4 furos em diferentes velocidades de rotação ilustra a tendência de que a maiores rpm a temperatura da massa é mais elevada (Figura 11). Os experimentos realizados com matriz de 6 furos apresentaram maiores temperaturas quando comparados com

matriz de 4 furos, quando consideradas as mesmas velocidades de rotação. A 300 rpm a temperatura tem a tendência de continuar subindo conforme a extrusão é realizada em ambas as aberturas de matriz, já a 200 rpm a temperatura teve um aclave suave durante a primeira metade do experimento, e na segunda metade teve um declive para a amostra realizada em matriz de 4 furos e uma certa estabilização na temperatura com 6 furos.

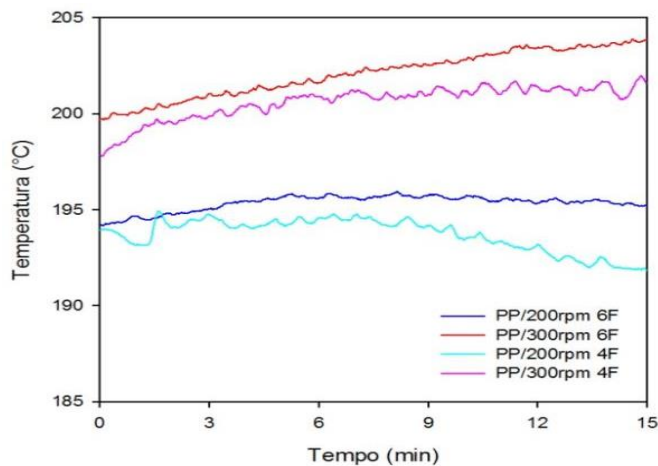


Figura 11 – Perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 e 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

A Figura 12 mostra o perfil da pressão do cabeçote da extrusora em função do tempo, e a Figura 13 indica o mesmo porém de forma suavizada a fim de melhorar a visualização, ilustrando assim a tendência de que a menores números de aberturas de matriz se registram maiores pressões. A matriz com 4 furos apresenta maiores pressões conforme menor seja a velocidade de rotação das roscas, já na matriz com 6 furos, além de possuir menores pressões quando comparado à matriz de 4 furos, a tendência se inverte, e observa-se maiores pressões quanto maior a velocidade de rotação.

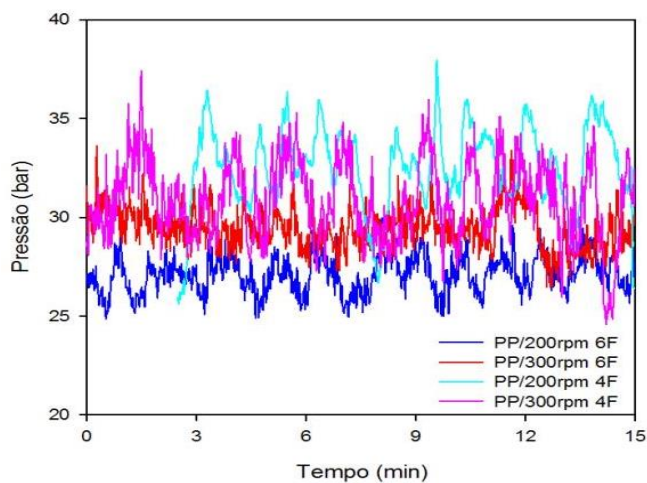


Figura 12 – Perfil da pressão no cabeçote na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 e 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

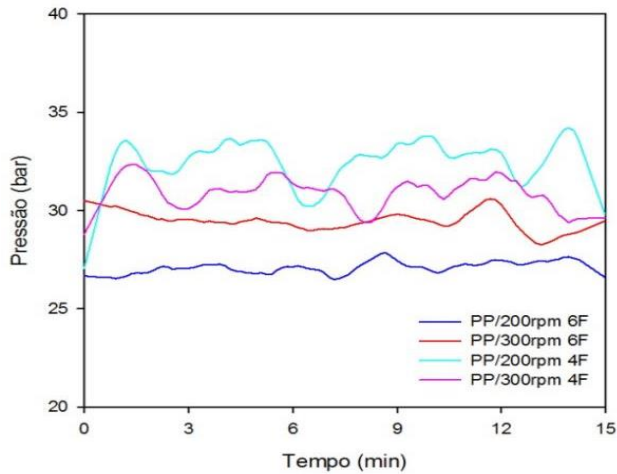


Figura 13 – Perfil suavizado da pressão no cabeçote na extrusão de polipropileno por uma matriz de 6 e 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

3.4. Extrusão de polipropileno/20% pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes velocidades de rotação

A Tabela 11 e a Figura 14 apresentam o comparativo da temperatura fixada e da temperatura medida nas zonas de aquecimento na extrusão de polipropileno e 20% de pó de madeira em matriz com 4 furos processados a 100, 200 e 300 rpm. Os resultados numéricos da Tabela 11 estão ilustrados na Figura 14.

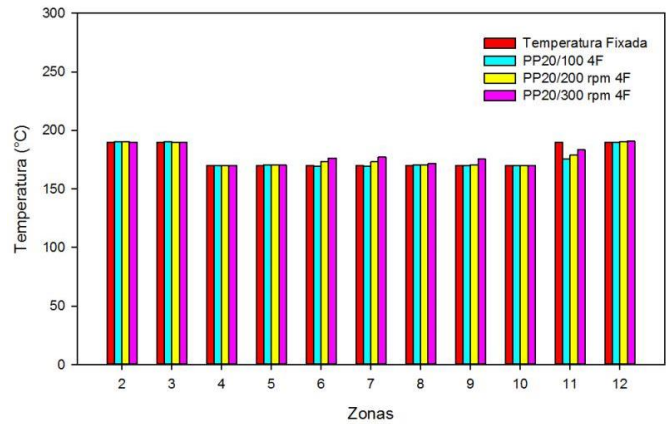


Figura 14 – Comparativo entre a temperatura fixada e a temperatura medida em cada zona na extrusão de polipropileno e 20% de pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

Nas zonas 2 a 10 observa-se que a temperatura medida apresenta variações inferiores a 5°C e superiores a 0,5°C as fixadas; porém, na zona 11 o inverso ocorre e na zona 12 novamente as temperaturas voltam a ser suavemente superiores. Em particular, a temperatura medida na zona 11 (última seção de barril) é significativamente inferior à temperatura fixada para todos os testes realizados. Valores médios de alguns parâmetros significativos durante 15 min processamento nas condições indicadas são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 – Comparativo da temperatura fixada e da temperatura medida nas zonas de aquecimento na extrusão de polipropileno e 20 % de pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

Zonas	T ₀ (°C)	PP20/100 rpm 4F (°C)	ΔT PP10/200 rpm 4F	PP20/200 rpm 4F (°C)	ΔT PP20/200 rpm 4F	PP20/300 rpm 4F (°C)	ΔT PP30/200 rpm 4F
2	190	190,1	0,1	190,1	0,1	190,1	0,1
3	190	190,1	0,1	190,0	0,0	190,1	0,1
4	170	169,9	-0,1	170,0	0,0	170,1	0,1
5	170	170,4	0,4	170,5	0,5	170,1	0,1
6	170	169,6	-0,4	173,5	3,5	170,0	0,0
7	170	169,4	-0,6	173,2	3,2	170,6	0,6
8	170	170,3	0,3	170,5	0,5	170,3	0,3
9	170	170,0	0,0	170,6	0,6	170,5	0,5
10	170	170,0	0,0	170,1	0,1	170,2	0,2
11	190	175,5	-14,5	178,8	-11,2	179,6	-10,4
12	190	190,0	0,0	190,5	0,5	190,9	0,9

O perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno e 20% de pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes velocidades de rotação, entre 100 e 300 rpm ilustra a tendência de que a maiores velocidades de rotação a temperatura da massa também seja mais elevada, como exposto na Figura 15. A temperatura em 100 rpm teve um

declive durante o processo. A temperatura durante o processamento é elevada de forma sutil e acentuada, para 200 e 300 rpm, respectivamente.

Tabela 12 – Parâmetros obtidos na extrusão de polipropileno e 20 % pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

Parâmetros	PP20/100 rpm 4F	PP20/200 rpm 4F	PP20/300 rpm 4F
G (kg/h)	10,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1
N (rpm)	100,0 ± 0,1	200,0 ± 0,1	300,1 ± 0,2
Gs (g/volta)	1,667	0,833	0,550
W (kW)	1,8 ± 0,0	2,9 ± 0,0	3,8 ± 0,1
Es (kWh/kg)	0,179 ± 0,003	0,293 ± 0,005	0,383 ± 0,006
Z (%)	41,2 ± 0,5	33,7 ± 0,3	29,3 ± 0,4
T (°C)	190,5 ± 0,7	197,6 ± 0,7	204,4 ± 1,5
P (bar)	40,8 ± 2,4	36,1 ± 2,1	32,8 ± 1,5

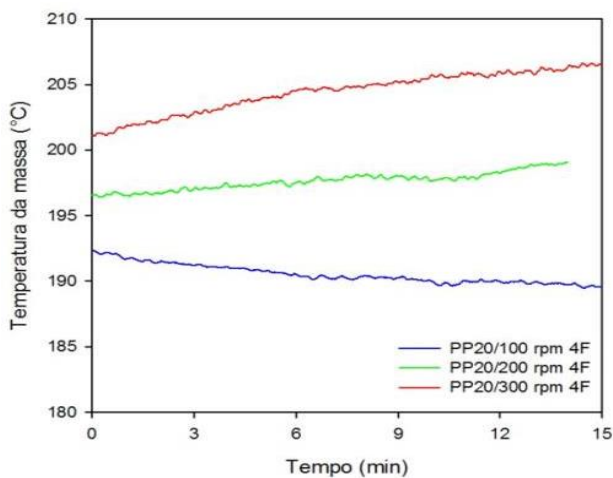


Figura 15 – Perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno e 20% de pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

A Figura 16 mostra o perfil da pressão no cabeçote na extrusão de polipropileno com 20% de pó de madeira em ma-

triz com 4 furos a 100, 200 e 300 rpm. Em menores velocidades de rotação a pressão no cabeçote é mais elevada. A velocidade de rotação de 100 rpm ocorreu uma elevação significativa na pressão durante o processamento, a uma velocidade de rotação de 200 rpm apresentou um sutil declive na pressão durante o processamento, já a velocidade de 300 rpm apresentou aumento na sua pressão durante o processamento.

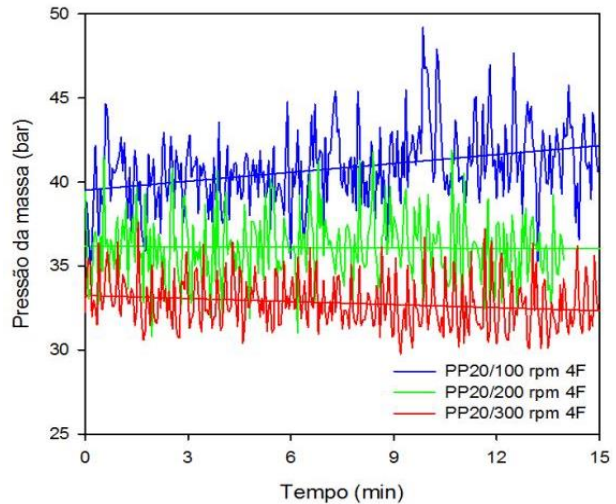


Figura 16 – Perfil da pressão no cabeçote na extrusão de polipropileno e 20% de pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes velocidades de rotação.

3.5. Extrusão de polipropileno/pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações.

A Tabela 13 apresenta o comparativo da temperatura fixada e da temperatura medida nas zonas de aquecimento na extrusão de polipropileno e pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações, 10%, 20% e 30% da massa total. Os resultados numéricos da Tabela 13 estão ilustrados na Figura 17.

Tabela 13 – Comparativo da temperatura fixada e da temperatura medida nas zonas de aquecimento na extrusão de compósitos de polipropileno e pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações.

Zonas	T ₀ (°C)	PP10/200 rpm 4F (°C)	ΔT PP10/200 rpm 4F	PP20/200 rpm 4F (°C)	ΔT PP20/200 rpm 4F	PP30/200 rpm 4F(°C)	ΔT PP30/200 rpm 4F
2	190	190,0	0,0	190,1	0,1	190,1	0,1
3	190	190,0	0,0	190,0	0,0	190,1	0,1
4	170	169,9	-0,1	170,0	0,0	170,1	0,1
5	170	170,1	0,1	170,5	0,5	170,1	0,1
6	170	173,4	3,4	173,5	3,5	170,0	0,0
7	170	175,0	5,0	173,2	3,2	170,6	0,6
8	170	170,0	0,0	170,5	0,5	170,3	0,3
9	170	171,3	1,3	170,6	0,6	170,5	0,5
10	170	169,9	-0,1	170,1	0,1	170,2	0,2
11	190	180,9	-9,1	178,8	-11,2	179,6	-10,4
12	190	190,2	0,2	190,5	0,5	190,9	0,9

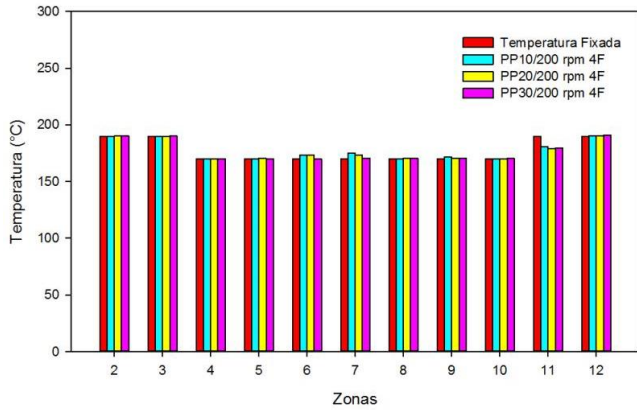


Figura 17 – Comparativo entre a temperatura fixada e a temperatura medida em cada zona na extrusão de polipropileno e pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações.

Nas zonas 2 a 10 observa-se que a temperatura medida é suavemente superior à fixada, tendo apenas variações inferiores insignificantes na composição com 10% de carga. Porém, na zona 11 ocorre uma inversão desse padrão, já na zona 12 se inverte esta tendência novamente e as temperaturas voltam a ser suavemente superiores. Em particular, a temperatura medida na zona 11 (última seção de barril) é significativamente inferior à temperatura fixada para todos os testes realizados.

Valores médios de alguns parâmetros significativos durante 15 min processamento nas condições indicadas são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros obtidos na extrusão de compósitos de polipropileno e pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações.

Parâmetros	PP10/200 rpm 4F	PP20/200 rpm 4F	PP30/200 rpm 4F
G (kg/h)	10,0 ± 0,2	10,0 ± 0,1	9,7 ± 2,5
N (rpm)	200,0 ± 0,1	200,0 ± 0,1	200,0 ± 0,1
Gs (g/volta)	0,833	0,833	0,800
W (kW)	3,1 ± 0,3	2,9 ± 0,0	3,2 ± 0,2
Es (kWh/kg)	0,314 ± 0,030	0,293 ± 0,005	0,366 ± 0,170
Z (%)	36,2 ± 3,3	33,7 ± 0,3	36,9 ± 2,7
T (°C)	198,7 ± 1,1	197,6 ± 0,7	199,4 ± 0,3
P (bar)	34,2 ± 2,5	36,1 ± 2,1	41,1 ± 2,5

O perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno e pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações ilustra a tendência de que a maiores concentrações de carga a temperatura da massa também seja mais elevada, como exposto na Figura 18. A temperatura em uma concentração de 10% da massa de pó de madeira teve um declive acentuado durante o processo, finalizando-o com a menor temperatura quando comparado às demais concentrações, na temperatura a uma concentração de 20% da massa de pó de madeira observou-se uma elevação durante o

processamento, já a temperatura a uma concentração de 30% da massa de pó de madeira se manteve mais constante durante o processamento, apenas com um pequeno acríve, e obtendo preponderantemente as maiores temperaturas durante o processamento, quando comparado às outras concentrações.

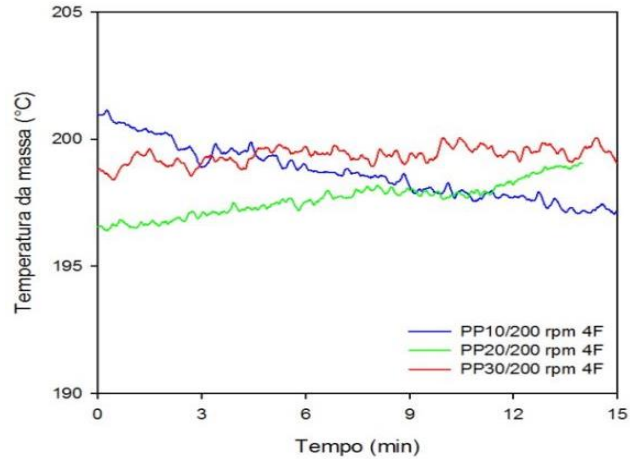


Figura 18 – Perfil da temperatura da massa fundida na extrusão de polipropileno e pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações.

O comportamento aparentemente anômalo da temperatura no teste com 10% de pó de madeira observado na Figura 18 pode ser talvez atribuído à falta de estabilização da temperatura entre testes sucessivos. Esse teste foi realizado, imediatamente após o teste com 20% pó de madeira a 300 rpm, com um intervalo de “estabilização” de 5 min entre um e outro teste. A temperatura final do primeiro teste (PP20/300 rpm 4F) foi aproximadamente 206°C, sendo a temperatura inicial do segundo teste (PP10/200 rpm 4F) aproximadamente 201°C. O breve período de “estabilização” foi apenas suficiente para uma queda de temperatura da massa de 5°C. A temperatura estável para esse segundo teste é provavelmente menor que a temperatura final de 197°C. Esta observação sugere que o tempo de estabilização entre testes deve ser bastante superior aos 5 min utilizados neste trabalho.

A Figura 19 mostra o perfil da pressão no cabeçote na extrusão de polipropileno e pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações. Ilustra a tendência de que a maiores concentrações de carga, a pressão no cabeçote também seja mais elevada. A concentração de 10% da massa de pó de madeira apresentou uma elevação na sua pressão durante o processamento, porém sempre se mantendo com pressões mais baixas, a concentração de 20% da massa de pó de madeira apresentou uma constância na sua pressão durante o processamento, sempre se mantendo com pressão intermediária, já a concentração de 30% da massa de madeira apresentou um suave aumento na sua pressão durante o processamento, sempre se mantendo com pressões mais elevadas, tendo pressões mais elevadas quando comparadas às composições anteriores.

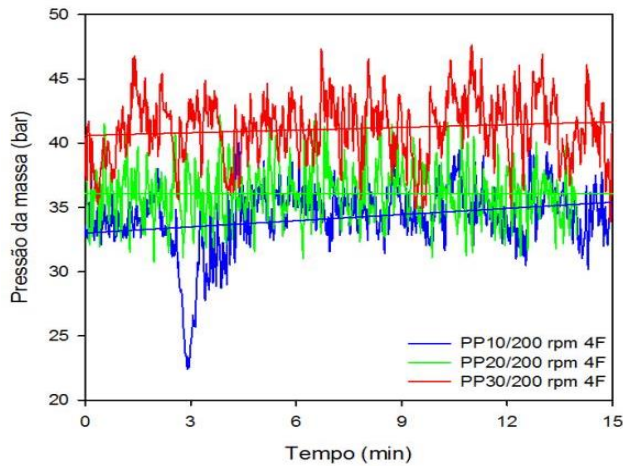


Figura 19 – Perfil da pressão no cabeçote na extrusão de polipropileno e pó de madeira em matriz com 4 furos em diferentes concentrações.

3.6. Aspecto visual do extrudado

As Figuras 20 e 21 comparam a cor do extrudado granulado obtido nos diferentes testes realizados com compósitos PP/pó de madeira. A Figura XXIII ilustra a variação na intensidade da cor com o aumento do teor de carga e a Figura XXIV o efeito da velocidade de rotação das roscas. Em particular, observa-se significativo escurecimento nos pellets processados a 300 rpm, que sugere o início da degradação térmica da carga.



Figura 20 – Efeito do teor de carga na cor dos pellets do compósito PP/pó de madeira extrudados a 200 rpm.

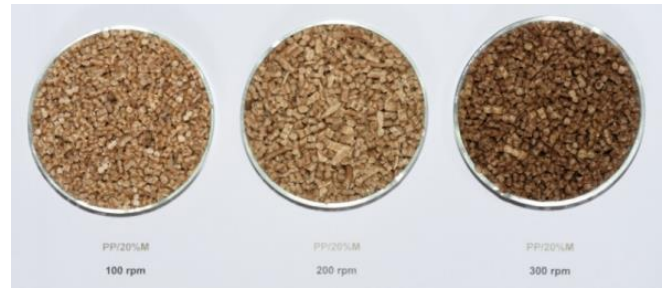


Figura 21 – Efeito da velocidade de rotação da rosca na cor dos pellets extrudados do compósito PP/pó de madeira com 20% de carga.

A extrusora, imediatamente depois de um teste possui um mecanismo que permite “puxar” as roscas pelo extremo da alimentação e fim. Dessa forma, é possível visualizar a distribuição de material na rosca (zonas cheias e vazias) e determinar a posição do início do processo de fusão.

A Figura 22 mostra a carcaça recuperada do primeiro bloco de malaxagem (no final do segundo barril). A Figuras 23 mostra as roscas imediatamente após o processamento a 200 rpm do compósito com 30% de pó de madeira.



Figura 22 – Carcaça extraída da rosca no primeiro bloco de malaxagem configurado, ilustrando a fusão do polipropileno. Na extrema esquerda observam-se pellets soltos no início do processo de fusão, seguidos da massa de polímero parcialmente fundido, com as marcas dos discos de malaxagem. Na extrema direita o polipropileno totalmente fundido preenche parcialmente a câmara de processamento.

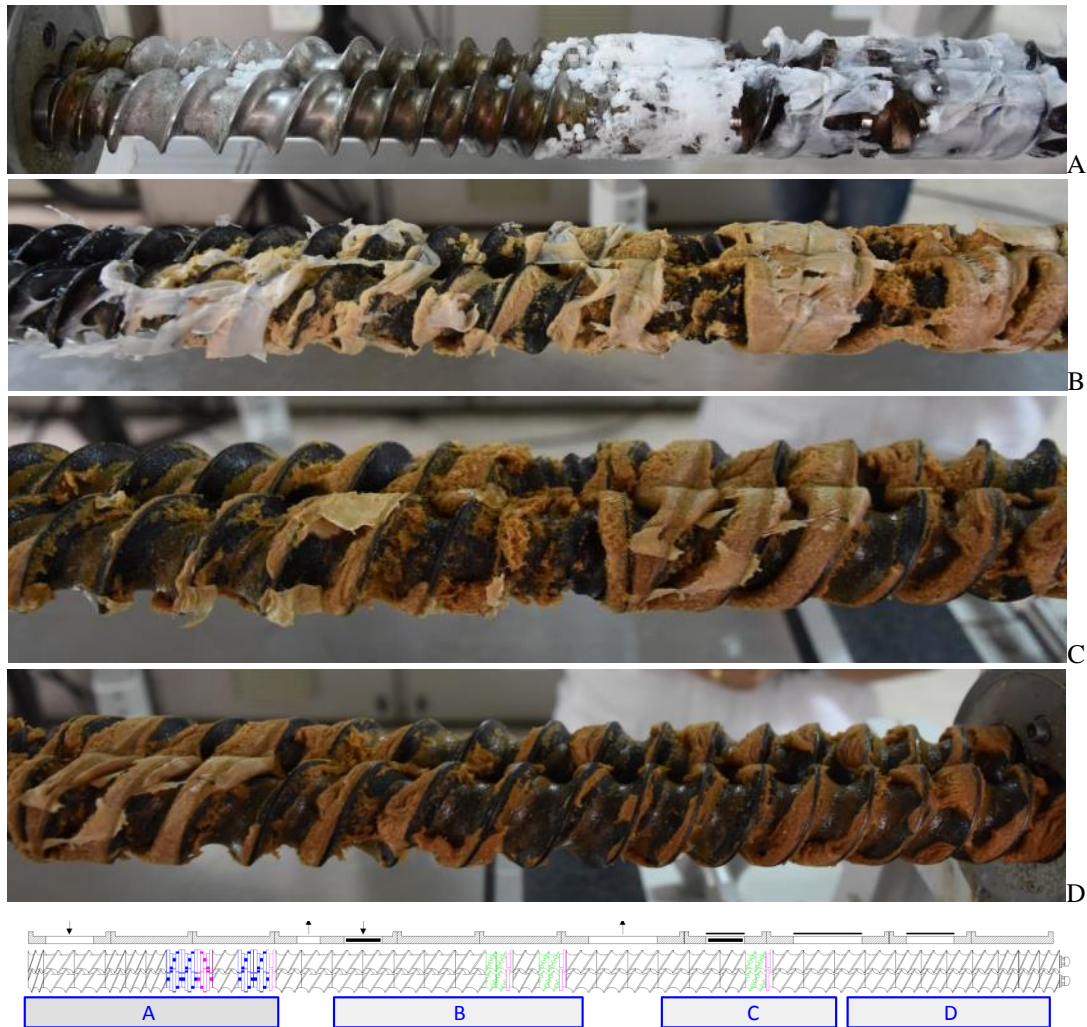


Figura 23 – Fotografia das roscas extraídas imediatamente depois do teste com PP/30% pó de madeira a 200 rpm, nas zonas indicadas no diagrama. Observam-se as diferentes zonas estruturais e sua função: alimentação do polímero particulado e fusão (A); alimentação do pó de madeira (B); seções de mistura distributiva (C); transporte do fundido por arraste e pressurização final (D).

Conclusões

Foi demonstrada a viabilidade de processar um PP heterofásico de média fluidez com pó de madeira em extrusora de dupla rosca corrotacional modular, com alimentação dividida e diferentes teores de carga e condições de processamento. Uma seleção de variáveis de processo (temperatura e pressão do cabeçote, energia específica, etc.) foi registrada e analisada como função do tempo para diferentes composições e condições operacionais, verificando-se, em geral, as tendências esperáveis.

Os testes reportados são uma primeira tentativa para obter informação de utilidade no planejamento de testes posteriores. Observou-se, por exemplo, que o estado estacionário de pressão e temperatura constantes no cabeçote não foi atingido entre testes no tempo disponibilizado (20 min).

Resumindo, foram estabelecidas e testadas as bases para o estudo compreensivo do processamento de compósitos de matriz termoplástica na extrusora de dupla rosca corrotacional do SENAI-CIMATEC.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio financeiro da CAPES e do CNPq e FAPESB.

Referências

- [1] W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering. An Introduction*. 8th Edition. Wiley: Hoboken NJ, 2010.
- [2] K. Kohlgrüber, *Co-Rotating Twin-Screw Extruders – Fundamentals, Technology, and Applications*. Hanser: Munich & Cincinnati, 2008.
- [3] P. G. Anderson. *Mixing practices in co-rotating twin screw extruders*. In: I. Manas-Zloczower (ed), *Mixing and Compounding of Polymers*, 2nd Edition. Hanser: Munich & Cincinnati, 2009; p. 947–980.
- [4] S. Albus, *Word market: polypropylene*. *Kunststoffe International* 100 (10), 61–67 (2010).

- [5] D. Tripathi, Practical Guide to Polypropylene. Rapra Technology, Shawbury (UK), 2002.
- [6] W. J. Kissel, J. H. Han, J. A. Meyer, Polypropylene: structure, properties, manufacturing processes, and applications. In: H. G. Karian (ed), Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, 2nd Edition. Marcel Dekker: New York, 2003; pp 25–48.
- [7] N. Pasquini (ed), Polypropylene Handbook, 2nd Edition. Hanser: Munich & Cincinnati, 2005.
- [8] M. Gahleitner, C. Tranninger, P. Doshev, Heterophasic copolymers of polypropylene: Development, design principles, and future challenges. Journal of Applied Polymer Science 130, 3928–3937 (2013).
- [9] A. K. Bledzki, V. E. Sperber, O. Faruk, Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers. Rapra Review Report # 152. Rapra Technology: Shawbury (UK), 2002.
- [10] A. K. Mohanty, M. Misra, L. T. Drzal (eds), Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis/CRC Press: Boca Raton FL, 2005.
- [11] C. M. Clemons, Wood flour. In: M. Xanthos (ed), Functional Fillers for Plastics, 2nd Edition. Wiley-VCH: Weinheim, 2010; pp 269–290.
- [12] T. R. Anunciado, Estudo da *Chorisia speciosa* e outras fibras vegetais como sorventes para o setor de petróleo. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2005.
- [13] A. Bismarck, S. Mishra, T; Lampke, Plant fibers as reinforcement for green composites. In: A K. Mohanty, M. Misra, L. T. Drzal (eds), Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis/CRC Press, Boca Raton FL, 2005; pp 51–123.
- [14] S. Godavarti, Thermoplastic wood fiber composites. In: A. K. Mohanty, M. Misra, L. T. Drzal (eds), Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Taylor & Francis/CRC Press: Boca Raton FL, 2005; pp 357–399.
- [15] M. Mack, Corotating intermeshing twin-screw extruders: Berstorff's system. In: D. B. Todd (ed), Plastics Compounding. Hanser: Munich & Cincinnati, 1998; pp 125–143.