

ANÁLISE DE VARIÁVEIS E DETERMINAÇÃO DO GRAU DE INCHAMENTO DO EXTRUDADO DURANTE O PROCESSAMENTO DE UM GRADE DE POLIPROPILENO INDUSTRIAL

VARIABLE ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE DIE SWELL DURING THE PROCESSING OF AN INDUSTRIAL POLYPROPYLENE GRADE

Agmar José de Jesus Silva^{1*}

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

*Autor correspondente: agmarster@gmail.com

RESUMO

Um grade de polipropileno industrial foi utilizado como proposta de trabalho prático experimental em uma disciplina de um curso de especialização em polímeros. Foi questionado como o autor poderia determinar o grau de inchamento do extrudado (IE) deste polipropileno utilizando apenas uma extrusora monorosca semiprofissional. O IE é um efeito viscoelástico natural decorrente do processamento. Contudo, uma vez dependente do tempo de relaxação do polímero e, portanto, das variáveis de processo, o seu controle inadequado pode levar ao comprometimento da qualidade do produto acabado devido ao surgimento de imperfeições dimensionais ou processos degradativos. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo descrever o processo de extrusão do polímero em questão e seus principais parâmetros para, em seguida, analisar o efeito destes sobre o IE do material. Observou-se que o aumento da velocidade de rotação do parafuso de 200 para 400 rpm causou aumento da taxa de cisalhamento devido à elevação da pressão de $8,0 \pm 0,5$ para $9,0 \pm 0,3$ Psi, respectivamente. Uma vez que o material era pseudoplástico, houve redução de sua viscosidade e, conseqüentemente, o torque médio se reduziu de $32,5 \pm 3,5$ para $30,5 \pm 2,12$ dN.m, para 200 e 400 rpm, respectivamente. A vazão de extrusão foi basicamente a mesma quando a velocidade de rotação subiu de 200 para 300 rpm ($55,39 \pm 5,35$ para $55,49 \pm 4,35$ g/min, respectivamente), porém, aumentou em 600 rpm ($66,75 \pm 4,01$ g/min), comprovando que o aumento da velocidade de rotação pode aumentar a capacidade de produção do parafuso para polímeros pseudoplásticos. O aumento da taxa de cisalhamento, até um limite crítico, deveria resultar no aumento do IE. Porém, neste caso, foram observadas reduções deste índice de $0,42 \pm 0,06$ para $0,34 \pm 0,05$, para 200 e 400 rpm, respectivamente, sugerindo que taxas de cisalhamento superiores ao valor crítico foram empregadas. Didaticamente, o trabalho foi importante para complementar e fixar conteúdos sobre reologia e processamento de polímeros previamente assimilados.

Palavras-chave: Aula experimental. Processamento de polipropileno. Extrusão. Inchamento do extrudado.

ABSTRACT

An industrial polypropylene grade was used as a proposal of an experimental work in a course of the *Lato Sensu* Course on Specialization in Polymers. Such proposal questioned how the author could determine the degree of swelling of the extrudate (*IE*) (or die swell) of this polypropylene using only a single-screw extruder. *IE* is a natural viscoelastic effect during the polymers processing. However, since it depends on the polymer's relaxation time and, therefore, on the process variables, its inadequate control can lead to the compromising of the finished product quality due to appearance of dimensional imperfections or degradative processes. In this context, the goal of this work was to describe the extrusion process of the polymer in question, as well as its crucial parameters aiming to analyze the effect of these parameters on the material's *IE*. It was observed that the increase in the rotation speed of the single-screw extruder from 200 to 400 rpm increased the shear rate due to the increase in pressure from 8.0 ± 0.5 to 9.0 ± 0.3 Psi. Since the material was pseudoplastic, a reduction of viscosity occurred and, consequently the average torque was reduced of 32.5 ± 3.5 to 30.5 ± 2.12 dN.m to 200 and 400 rpm, respectively. The extrusion flow rate was the same when the speed screw increased from 200 to 300 rpm (55.39 ± 5.35 to 55.49 ± 4.35 g/min, respectively), however, it increased at 600 rpm (66.75 ± 4.01 g/min), showing that increasing in speed screw can increase the production screw capacity for case of pseudoplastic polymers. Increasing shear rate up to a critical limit should result in *IE* increasing. However, in the present case, reductions were observed in this index, i.e., *IE* changed of 0.42 ± 0.06 to 0.34 ± 0.05 for 200 and 400 rpm, respectively, suggesting that shear rates higher than the critical value were employed. Didactically, this work was important to complement and fix theoretical knowledge on rheology and polymers processing previously assimilated.

Keywords: Experimental class. Polypropylene processing. Extrusion. Die Swell.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os materiais plásticos (ou poliméricos) têm uma posição importante na indústria junto aos materiais cerâmicos ou metálicos devido principalmente às suas características de leveza e moldabilidade. Tais características lhes permitem a produção de uma grande diversidade de artefatos e peças, as quais podem ser geradas por diferentes técnicas de processamento, tais como extrusão, injeção, sopro, calandragem, compressão, transferência, rotomoldagem, entre outras [1], [2], [3].

Todas as técnicas de processamento de plásticos são tecnologias que visam converter o polímero (ou composto contendo polímero) em um artigo com forma e propriedades desejadas. Alguns dos fatores de peso na seleção do tipo de processamento adequado são a natureza do polímero (termoplástico ou termorrígido), a forma desejada da peça (ou produto) e a complexidade da mesma, ou seja, peças muito complexas as vezes precisam ser feitas em partes e depois coladas e/ou soldadas, por exemplo, por termofusão. Conforme Manrich [3], além desses fatores, é de fundamental importância o conhecimento do comportamento do polímero sob fluxo, ou seja, a faixa de viscosidade e o índice de fluidez (MFI) de cada material.

A viscosidade é a resistência ao fluxo (ou à deformação) oferecida pelo material. É representada por um fator proporcional entre a energia (tensão cisalhante, σ) e a frequência (taxa de cisalhamento, $\dot{\gamma}$) [3]. Quando submetido ao cisalhamento, o material polimérico poderá apresentar um comportamento denominado newtoniano se a tensão cisalhante for linearmente proporcional à taxa de cisalhamento, ou seja, a viscosidade será uma constante [2], [3].

Por outro lado, o polímero terá um comportamento dito pseudoplástico quando a viscosidade diminuir com o aumento da taxa de deformação [2], [3]. A maioria dos polímeros se comporta como materiais pseudoplásticos, porém, em baixas taxas de deformação muitos deles podem apresentar comportamento newtoniano, tornando-se pseudoplásticos em taxas de cisalhamento intermediárias e, em taxas elevadas, voltam a ser newtonianos [2], [3].

O índice de fluidez (MFI) do polímero é dado em g/10min, e representa a massa do polímero fundido que escoar por uma capilar em um determinado intervalo de tempo sob condições operacionais específicas. Dessa forma, o MFI é dependente tanto das propriedades moleculares, tais como peso molecular e ramificações de cadeia, quanto das condições do ensaio, por exemplo, carga e temperatura [3], [4], [5]. O MFI é um método de ensaio particularmente utilizado para indicar a uniformidade da taxa de fluxo do polímero em um processo, sendo por isso um indicativo de outras propriedades, tais como o peso molecular e a viscosidade, oferecendo, portanto, uma boa noção da processabilidade do material [3], [6], [7].

Ao se deformarem, os materiais podem se comportar como sólidos elásticos, viscosos ou viscoelásticos (caso dos materiais poliméricos) [1], [2], [3], [8], [9]. A viscoelasticidade é um comportamento (ou resposta) à deformação, onde simultaneamente se observa o comportamento elástico (ocorre total recuperação da deformação após a retirada da tensão aplicada), e o viscoso (a deformação é permanente, isto é, não recuperável) [8], [9].

Durante o processamento dos materiais poliméricos, alguns efeitos viscoelásticos podem ser gerados, dentre eles o efeito denominado de inchamento do extrudado (*IE*). Conforme Manrich [3], ao ser deformado por cisalhamento entre as paredes de uma matriz, o polímero tem suas cadeias orientadas na direção do fluxo, ao mesmo tempo em que tenta recuperar essa deformação elástica ainda dentro da matriz. Porém, devido ao desequilíbrio entre a deformação e a recuperação, permanece uma parcela da deformação que somente é recuperada fora dos canais, sendo essa quantidade dependente do tempo de relaxação do polímero, que, por sua vez, é dependente da temperatura, da taxa de cisalhamento, do coeficiente de atrito e das dimensões da matriz. A Figura 1 ilustra teoricamente o fenômeno do inchamento do extrudado.

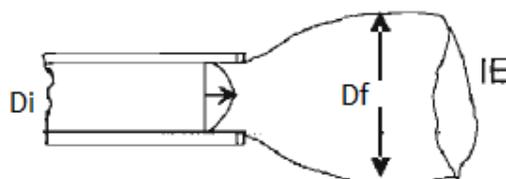


Figura 1 – Ilustração da ocorrência do *IE* durante a extrusão de uma massa polimérica plastificada.
 D_i – diâmetro inicial, D_f – diâmetro final. Fonte: Adaptado de [3].

O *IE* por si só é um efeito viscoelástico natural decorrente do processamento, não sendo prejudicial ao polímero. Dependendo do processo, ele pode inclusive contribuir para o controle dimensional do extrudado, e facilitar a calibração de um perfil fora da matriz, entre outros fatores [3]. Contudo, uma vez dependente do tempo de relaxação do polímero e, portanto, das variáveis de processo, o seu controle inadequado pode levar ao comprometimento da qualidade do produto acabado devido ao surgimento de imperfeições dimensionais e/ou processos degradativos das cadeias poliméricas.

Dentre os polímeros comuns do mercado das “*commodities*”, ou seja, polímeros de uso geral, baratos e de elevado consumo a nível mundial, o polipropileno (sigla PP) (Figura 2) é um termoplástico de interesse especial devido tanto à sua facilidade de processamento quanto ao seu amplo rol de aplicações [10], [11], [12]. O polipropileno pode existir em formas variadas, tais como PP homopolímero e os copolímeros heterofásico e randômico [9], [13], [14]. O PP

homopolímero contém apenas o monômero propileno em sua cadeia molecular e tem configuração isotática, portanto, pode atingir elevados graus de cristalinidade (até 70%) [3], [9], [11]. Suas aplicações são diversas, abrangendo recipientes em geral, brinquedos, sacaria, tubos, válvulas, carcaças de eletrodomésticos e até para-choque de carros [11], [13], [15].

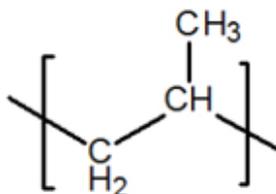


Figura 2 – Estrutura molecular do PP. Fonte: Adaptado de [13].

Na área de ensino e aprendizagem de ciências, tal como a química, existe praticamente um consenso em que o trabalho experimental se constitui em um poderoso recurso didático [16], [17], [18]. Hodson (1985) *apud in* Lôbo (2012) [16], chama atenção para três aspectos do trabalho experimental, sendo estes a proposta do experimento, o procedimento experimental e os resultados obtidos. Para o referido autor, cada um desses aspectos tem diferentes funções pedagógicas, ou seja,

a proposta do experimento é importante no ensino e compreensão do método científico, o procedimento experimental pode aumentar a motivação dos alunos e ensinar-lhes as tarefas manipulativas, e a discussão dos resultados contribui para a aprendizagem dos conceitos científicos ([16], p. 430).

Ou seja, por meio do procedimento experimental o professor pode fazer a mediação do processo de ensino de modo a favorecer a aprendizagem através da realização de tarefas manipulativas por parte dos alunos.

Tendo em vista a importância da atividade experimental e o seu uso como recurso didático no ensino de conhecimentos químicos, e levando em consideração a abrangência e a versatilidade do polipropileno do ponto de vista de sua processabilidade e aplicações, este trabalho, o qual se originou de uma atividade prática em uma disciplina do curso de Especialização em Processamento de Plásticos e Borrachas do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IMA/UFRJ), teve por objetivos realizar e descrever o processo de extrusão de um *grade* de polipropileno industrial recebido como proposta de trabalho (o polipropileno KM6100), determinar seus principais parâmetros de processo e, por fim, analisar o efeito destes sobre o grau inchamento do extrudado do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Foram utilizados como matéria-prima no processo de extrusão em questão, o polipropileno KM6100, da fabricante *Quattor*, com MFI de 3,5 g/10min (índice de fluidez, nas condições 230 °C/2,16 kg) e densidade igual 0,905 g/cm³. As temperaturas de transição vítrea (T_g) e fusão cristalina (T_m) reportadas pelo fabricante foram de - 20 e 165 °C, respectivamente.

Adicionalmente, foi disponibilizado pelo Laboratório de Apoio Tecnológico da UFRJ (LAPTEC/IMA/UFRJ), um equipamento de extrusão do tipo Extrusora Dupla Rosca Co-rotacional Interpenetrante, da fabricante *Teck Tril*, Modelo DCT-20, com diâmetro da rosca de $D = 20$ mm e razão entre comprimento e diâmetro das roscas ($L/D = 36$), tal como apresentado no modelo ilustrativo da Figura 3.

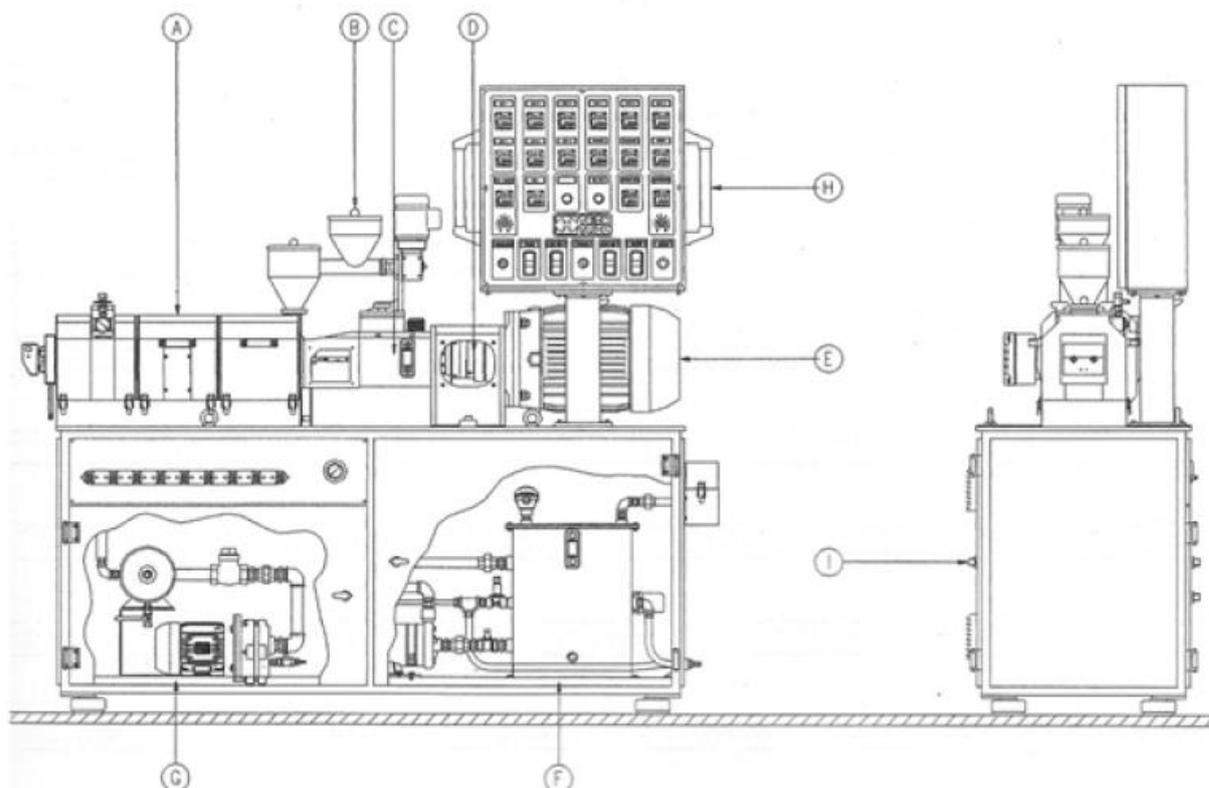


Figura 3 – Modelo de extrusora dupla rosca co-rotacional pertencente ao LAPTEC/IMA/UFRJ. A) canhão e rosca, B) alimentador, C) transmissão, D) acoplamento limitador de torque, E) motor principal, F) refrigeração, G) filtro separador de degasagem, H) painel de comando e I) painel elétrico. (Fonte: Adaptado de [19]).

2.2. Metodologia

Para atingir os objetivos propostos no trabalho, a parte experimental e prática foi composta por quatro etapas principais:

1ª parte: Consistiu no desmonte a ajuste de uma matriz tubular com mandril centralizado na base, visando o entendimento da engenharia de posicionamento das suas diversas partes e sua importância no bom funcionamento de um processo de extrusão do tipo tubular e contínuo.

2ª parte: Realização de medições e aferição de dimensões do parafuso sem-fim da extrusora, com vistas a entender seus aspectos fundamentais e seu funcionamento.

3ª parte: Extrusão propriamente dita do polipropileno KM6100, nas velocidades de rotação do parafuso sem-fim de 200, 300 e 400 rpm (rotações por minuto), visando analisar o efeito das diferentes condições cisalhantes no processamento do material. O perfil de temperatura de processamento dos *pellets* (grânulos sólidos) do polipropileno foi de 140 °C (na primeira zona-alimentação), 160 °C (na zona de compressão) e de 180 °C na zona de dosagem (ou de calibração) e no cabeçote (o cabeçote e a zona de dosagem têm temperaturas mais elevadas para manter a temperatura do polímero fundido e da matriz próximas ao valor da temperatura de fusão do material, permitindo seu escoamento na forma plastificada). A processabilidade do polipropileno foi estudada empregando-se uma matriz capilar tripla de diâmetro $D = 1,5 \pm 0,01$ mm, fixada no cabeçote e acoplado à extrusora, tal como apresentado na ilustração simplificada de uma extrusora na Figura 4.

4ª parte: Determinação e análise dos parâmetros vazão de extrusão, pressão e torque médio, em função do aumento da velocidade de rotação do parafuso sem-fim.

5ª parte: Medições do grau de inchamento do extrudado (*IE*) dos filamentos (“espaguetes”) de polímero obtidos nas diferentes condições empregadas na extrusão do polipropileno KM6100 e estabelecidas na 3ª parte.

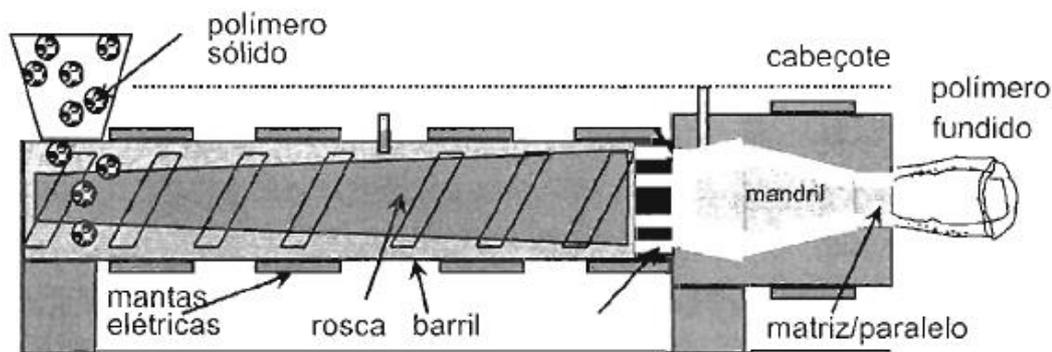


Figura 4 – Ilustração das partes principais de uma extrusora, onde pode ser visto com clareza a alocação do sistema cabeçote e matriz na porção final (região de saída do polímero fundido). Adaptado de [3].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ajuste de matriz tubular com mandril centralizado na base

A análise do processo de extrusão termoplástica em questão teve início com a etapa de ajuste de uma matriz tubular com mandril centralizado na base. A matriz de extrusão, juntamente com o parafuso sem-fim têm papéis fundamentais no processo de plastificação do polímero, distribuição e homogeneização do fluxo de massa fundida dentro do canhão durante o processamento. É justamente o trabalho conjunto dessas duas estruturas que garante a boa qualidade em termos de homogeneidade do produto final.

A matriz, em particular, tem a função de moldar a massa viscosa, evitando a formação de linhas de memória (ou linhas de solda) [3]. São encontrados dois tipos principais de matrizes: de sustentação, tais como os tipos cruzeta, estrela ou aranha; e de distribuição, tais como a espiral e a anelar. Neste trabalho foi feito, inicialmente, o processo de desmontagem e montagem de uma matriz anelar com mandril fixado diretamente na base do corpo (Figura 5a–b), com fins de observação e fixação de conceitos sobre matrizes. É fundamental a centralização do mandril, tal como mostra a Figura 5b, para que seja obtido um balanceamento adequado do fluxo de material fundido e plastificado, de forma que a pressão seja igualmente distribuída em todos os pontos do canal de ar ascendente. Esse canal tem a função de auxiliar no processo de extrusão tubular, mantendo a forma do produto. Apesar da importância da matriz anelar, para fins de adequação e execução do trabalho prático em uma aula experimental, esta foi posteriormente substituída por uma matriz capilar tripla (menos complexa), tal como descrita no subitem 2.2, a qual foi então utilizada na extrusão do polipropileno em questão.

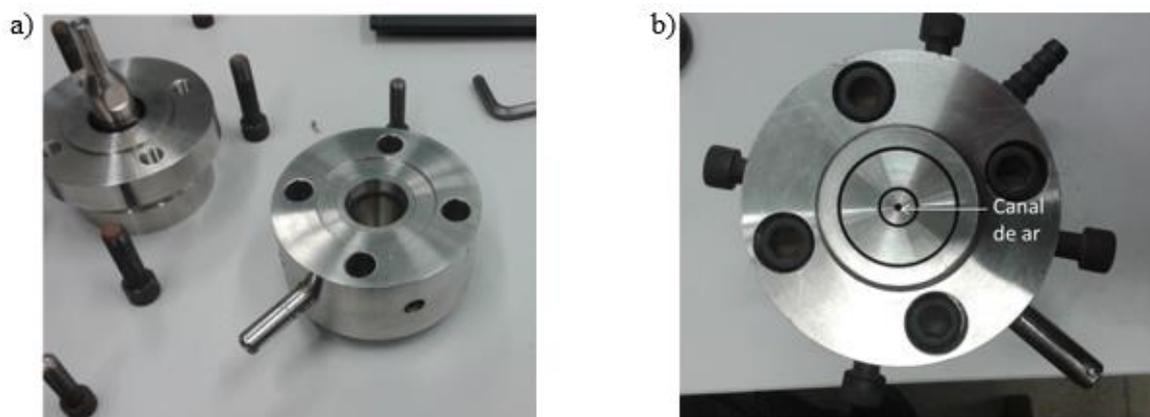


Figura 5 – Componentes desmontados de uma matriz anelar (a). Matriz anelar com mandril fixado diretamente na base do corpo, com destaque para o canal de ar ao centro (b). (Fonte: Autor, 2020).

Existem muitas matrizes utilizadas no processamento de polímeros, tais como matrizes para extrusão, sopro, injeção, entre outras [3], [20]. Todas elas são canais estrategicamente construídos em blocos ou chapas metálicas de aço ou outras ligas [3], por onde flui a massa fundida dos polímeros devidamente plastificados e homogeneizados. As matrizes são colocadas na extremidade das extrusoras, ajudando a gerar gradiente de pressão ao longo da rosca e também dando forma à massa extrudada. Como a extrusão é um processo contínuo, o formato do produto final gerado pela matriz possui variações geométricas no sentido transversal ao fluxo (direções x, y), caracterizando-se como um processo bidimensional [3]. As peças moldadas podem ter as mais variadas geometrias, a depender do tipo de matriz empregada: tubos, chapas, filmes, filamentos, perfis, até recobrimento de fios, tecidos, entre tantas outras [1], [2], [3], [11]. O processo se aplica a polímeros virgens, reciclados ou misturas poliméricas [1], [9], [20], [21].

No caso do presente trabalho, como optou-se pela utilização de uma matriz capilar tripla, o resultado obtido foi a geração de filamentos (ou “macarrão”) de polipropileno. Mesmo assim, a realização do processo de montagem e desmontagem do sistema formado pela matriz anelar foi também de suma importância para uma melhor compressão da variedade de possibilidades existentes, assim como o seu modo de funcionamento durante o processo de extrusão.

3.2. Aferições do parafuso sem-fim

Dentre os componentes de uma extrusora, o parafuso sem-fim (ou simplesmente rosca) é certamente uma peça com importância destacada devido às suas várias funções: transportar, fundir/amolecer, homogeneizar e plastificar o polímero. Além disso, auxilia na elevação da pressão da massa polimérica ao longo do seu comprimento, visando garantir um perfil de produto compacto e isotrópico. Todo este rol de funções somente é possível devido ao movimento de cisalhamento criado entre o parafuso, os grânulos do polímero e as paredes do barril, à medida que o parafuso é rotacionado durante o processamento.

O cisalhamento gerado pela rosca produz cerca de 80% da energia térmica necessária para transformar os polímeros [3], [20], [21]. A outra parte é obtida por aquecedores externos (resistências elétricas) [3], [20]. Há diversos modelos de parafuso sem-fim, os quais são cada qual projetados para um tipo ou grupo específico de polímeros. Contudo, os dois tipos principais são as roscas com diâmetros externos constantes e as roscas cônicas, cujo diâmetro é variável. Na Figura 6, abaixo, pode ser visto um parafuso sem-fim real, cujas dimensões foram mensuradas e analisadas neste trabalho. Esta é uma rosca cônica, isto é, seu diâmetro é variável, pois o diâmetro dos filetes é diferente em cada região a compõe.



Figura 6 – Parafuso sem-fim. (Fonte: Autor, 2020).

A Tabela 1 apresenta um resumo das dimensões mensuradas no parafuso sem-fim da Figura 6, as quais foram feitas com uso de um paquímetro. Como pode ser visto, existe uma diferença considerável entre os valores de diâmetros dos filetes nas diferentes zonas que compõem o parafuso sem-fim (zonas de alimentação, de compressão e de homogeneização ou dosagem). Em síntese, a zona de alimentação é responsável pelo transporte inicial da carga sólida de polímero, garantindo que não ocorra o retorno da mesma. Na zona seguinte, a de compressão, ocorre de fato o processo de fusão do material sólido devido ao alto grau de cisalhamento e a conseqüente geração de calor. Na parte final tem-se a zona de controle de vazão (ou zona de dosagem), a qual é responsável pela finalização da homogeneização da massa fundida e pela garantia do fluxo uniforme desta até o sistema matriz e cabeçote, de onde sairá o material extrudado. Dessa forma, conforme Manrich [3], a geometria da rosca é fundamental e afeta a plastificação do polímero pelo fato de atingir, de maneira diferenciada, as características de transferência de calor, taxa de cisalhamento e uniformidade da vazão da massa fundida.

Tabela 1 – Parâmetros aferidos no parafuso sem-fim avaliado. (Fonte: Autor, 2020).

| Parâmetro aferido da rosca | Valor encontrado e unidade |
|--|---|
| Ângulo do filete | 17,8 ° |
| Comprimento do parafuso (L) | 54,4 cm ou 61,5 cm até a base |
| Diâmetro externo/interno da rosca | Variável conforme a região da rosca |
| Diâmetros dos filetes de 1 a 17 (zona de alimentação) | 1 a 17: 1,16 cm 18: 1,22 cm 19: 1,32 cm |
| Diâmetros dos filetes de 18 a 22 (zona de compressão) | 20: 1,43 cm 21: 1,53 cm 22: 1,62 cm |
| Diâmetros dos filetes de 23 a 26 (zona de homogeneização ou de dosagem) | 23 a 26: 1,66 cm |
| Largura dos filetes | 0,36 cm |
| Passo dos filetes | 1,52 cm |
| Altura dos filetes | Dependente do diâmetro externo/interno (variou de 0,67 a 0,23 cm) |

Esta etapa da atividade prática, do ponto de vista pedagógico, foi crucial na melhoria do entendimento acerca do funcionamento do processo de fusão e plastificação do polímero durante a extrusão, uma vez que foi possível visualizar e manusear fisicamente uma monorosca real. Isto possibilitou a identificação de suas diferentes regiões, assim como suas características fundamentais, as quais permitem que cada zona possa exercer seu papel complementar no processo global da extrusão.

3.3. Extrusão do polipropileno

O processo de extrusão do polipropileno em questão foi iniciado com a alimentação do polímero sólido (*pellets*) no funil de alimentação da extrusora, conforme pode ser visto na Figura 7a. Após essa etapa, o movimento do parafuso promove o transporte do material, preenchendo os vazios entre os filetes. Durante esse processo o material é progressivamente aquecido, plastificado, comprimido e finalmente forçado através do orifício da matriz existente na extremidade do cilindro, conforme pode ser visto na Figura 7b.

Dado que os polímeros em geral possuem baixa condutividade térmica e alta viscosidade no estado anterior ao momento de ser conformado pela matriz (na parte frontal da extrusora), torna-se fundamental que a plastificação do polímero ocorra principalmente por trabalho mecânico, advindo do cisalhamento, uma vez que a fusão polímero utilizando apenas o calor oriundo das resistências elétricas externas teria um elevado custo energético, além de demandar tempos longos para ocorrer, conforme reportado por [3].

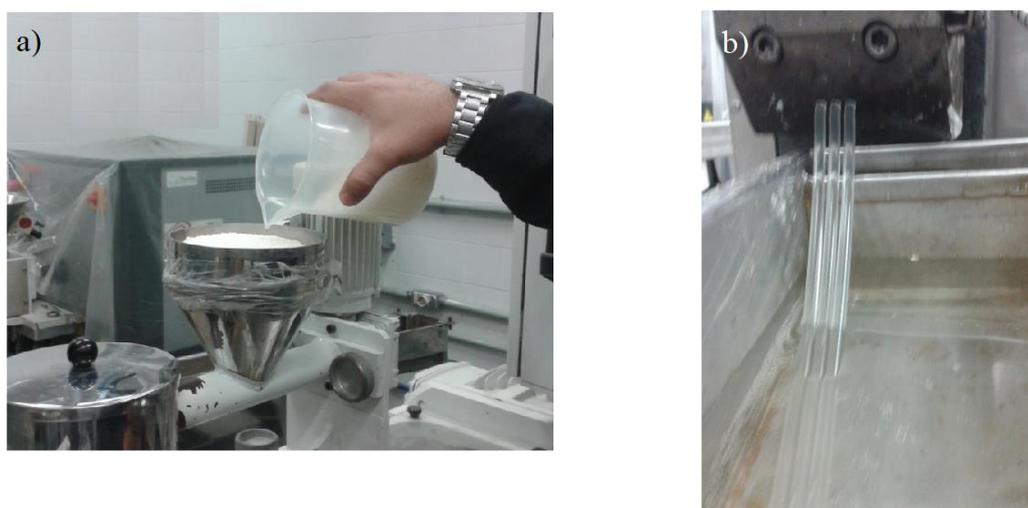


Figura 7 – a) Alimentação da extrusora com *pellets* de polipropileno através do funil de alimentação. b) Saída de filetes de polipropileno (“macarrão”) na matriz tripla, seguida de resfriamento em água à temperatura ambiente (Fonte: Autor, 2020).

Como regra básica, os polímeros semicristalinos [9], [22], [23], como é o caso deste polipropileno, não podem ser processados na temperatura de fusão, ou para o caso de polímeros amorfos (aqueles que não possuem arranjo cristalino), na temperatura onde o polímero será predominantemente viscoso, pois a tensão de cisalhamento nestes casos seria muito alta a ponto de causar degradação das cadeias poliméricas [10], [13], [24].

Em função disso, cada material tem uma temperatura ou faixa de temperatura na qual ele possa ser processado (sem que ocorra degradação), isto é, apresente plasticidade e fluidez adequadas para adentrar pelos canais da extrusora sob pressões específicas [3]. A plastificação gerada pelo cisalhamento é o fator principal que transforma o polímero em uma pasta no estado moldável, permitindo sua saída pela matriz e o ajuste ao formato dela. A temperatura da zona de compressão, que é onde o polímero é de fato fundido e plastificado pela ação conjunta do calor das resistências elétricas e do alto cisalhamento gerado pela rosca, foi de 160 °C (como mencionado subitem 2.2), uma vez que o PP funde em torno dessa temperatura [3].

O processo de extrusão realizado com este *grade* de polipropileno (e descrito acima) foi repetido três vezes, empregando-se os mesmos perfis de temperatura, porém, com alterações na velocidade de rotação do parafuso para os valores de 300 e 400 rpm, além do valor inicial de 200 rpm, conforme descrito na metodologia (subitem 2.2). As análises de alguns dos principais parâmetros de extrusão obtidos (vazão de extrusão, pressão e torque médio em função da velocidade de rotação do parafuso sem-fim), assim como a medida do grau de inchamento do extrudado (*IE*) seguem discutidos (subitens 3.4 e 3.5).

3.4. Análise da vazão de extrusão, pressão e torque médio

O gráfico da Figura 8 mostra o comportamento do torque médio desenvolvido (em dN.m) e registrado pelo painel de controle da máquina em função das diferentes velocidades de rotação do parafuso sem-fim empregadas. Conforme Manrich [3], ao se aumentar a velocidade de rotação do parafuso sem-fim, a capacidade de bombeamento muda, bem como se altera o grau de mistura do polímero e a pressão. Consequentemente, o cisalhamento e o calor gerado por atrito são elevados. No entanto, na Figura 8 é possível observar claramente que na presente situação, o aumento da rotação do parafuso sem-fim de 200 para 300 e 400 rpm causou queda no torque médio registrado (redução de $32,5 \pm 3,5$ para $30,5 \pm 2,12$ dN.m, para as velocidades de 200 e 400 rpm, respectivamente), quando era esperado um aumento deste devido ao aumento do cisalhamento. Tal fato ocorreu porque o material era consideravelmente pseudoplástico (representativo da região de $n < 1$ na equação de lei de potência entre tensão (σ) e taxa de

cisalhamento ($\dot{\gamma}$), conforme descrito por [2], [3], [15]), logo, houve redução da viscosidade em função desse aumento da taxa de cisalhamento e, conseqüentemente, o torque médio resultante sofreu as reduções reportadas na Figura 8.

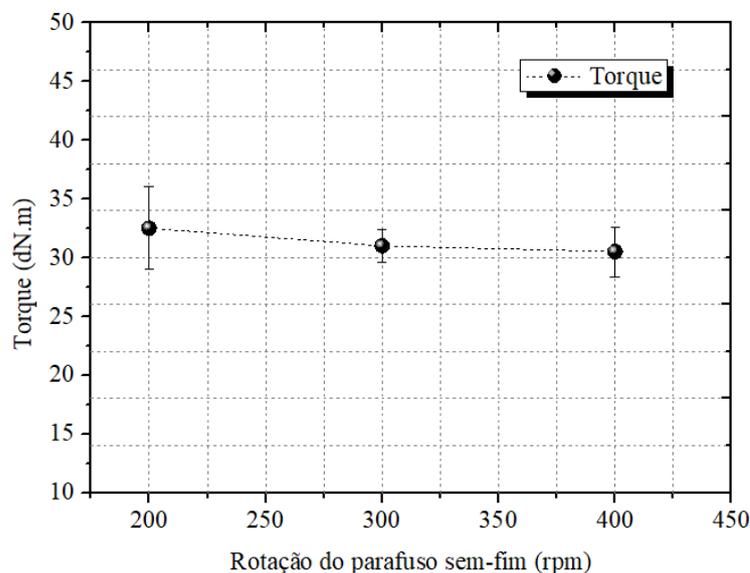


Figura 8 – Torque médio em função do aumento da velocidade de rotação do parafuso sem-fim.
(Fonte: Autor, 2020).

O gráfico da Figura 9 apresenta o comportamento da vazão (em g/min) e da pressão (em Psi) em função do aumento da velocidade de rotação do parafuso de 200 para 300 e 400 rpm. Observou-se que a vazão foi basicamente a mesma quando a rotação subiu de 200 para 300 rpm (mudou apenas de $55,39 \pm 5,35$ para $55,49 \pm 4,35$ g/min, respectivamente), mesmo com aumento da pressão nesta faixa ($8,0 \pm 0,5$ para $9,0 \pm 0,2$ Psi, respectivamente). Porém, aumentou consideravelmente quando a rotação atingiu 400 rpm (foi para $66,75 \pm 4,01$ g/min), comprovando que o aumento da velocidade rotação da rosca, dentro de determinada faixa de valores e para pressões específicas, é uma das maneiras de aumentar a capacidade de produção da extrusora.

Contudo, isso só foi possível neste caso, onde a pressão não aumentou mais quando a rotação passou de 300 para 400 rpm (a qual se manteve em $9,0 \pm 0,3$ Psi a 400 rpm), o que somente ocorreu pelo fato desse polipropileno ser consideravelmente pseudoplástico [2], [3], tal como já havia sido verificado pela análise do torque médio. Caso não fosse assim, haveria um efeito de elevação significativa da pressão e, conseqüentemente, do grau de atrito e da temperatura da massa polimérica fundida, pois a viscosidade não se reduziria, e o efeito global sobre a capacidade de produção do parafuso sem-fim seria o contrário, ou seja, a produção não seria aumentada pois certamente iria ocorrer degradação térmica das cadeias poliméricas, tal como discutido por Almeida [10].

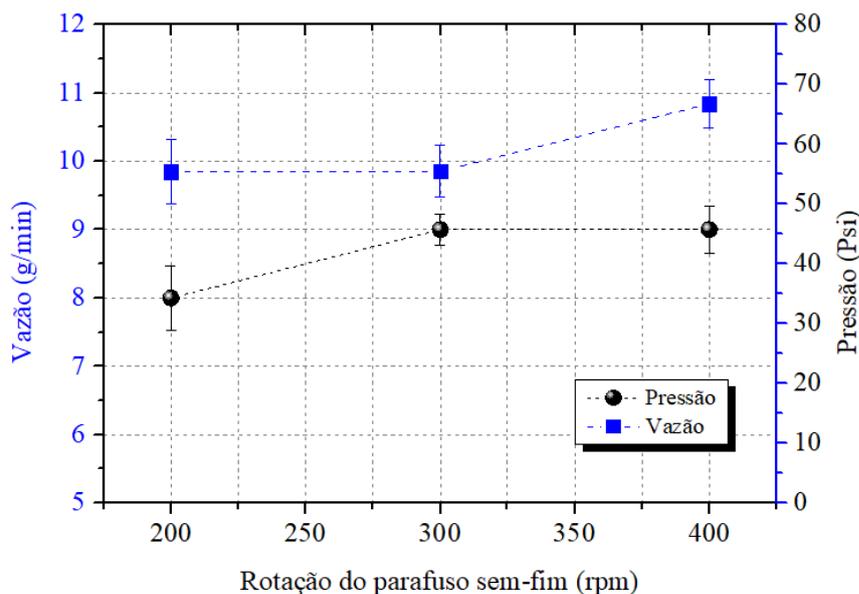


Figura 9 – Comportamento da vazão e da pressão em função do aumento da velocidade de rotação do parafuso sem-fim. (Fonte: Autor, 2020).

Além do aumento da velocidade de rotação do parafuso, outra maneira de aumentar a capacidade de produção, isto é, aumentar a vazão da extrusora, com plastificação eficiente, é utilizar elementos de rosca, ou seja, roscas com misturadores e/ou cisalhadores intensivos devidamente localizados ao longo da sua estrutura [3], [25], tal como mostram os exemplos na Figura 10. Estes misturadores desempenham um papel de garantia de qualidade do extrudado dentro de um limite maximizado de produtividade, e os cisalhadores atuam contribuindo para aumentar a eficiência da fusão. Os principais sistemas de aumento de eficiência de roscas são: misturadores intensivos, zonas de alto cisalhamento, rosca com barreiras do tipo *Maillefer* (roscas dupla hélice com passos diferentes), barreiras *Barr* (roscas dupla hélice com variações nos ângulos de hélice), estranguladores diversos, entre outros [3], [25].

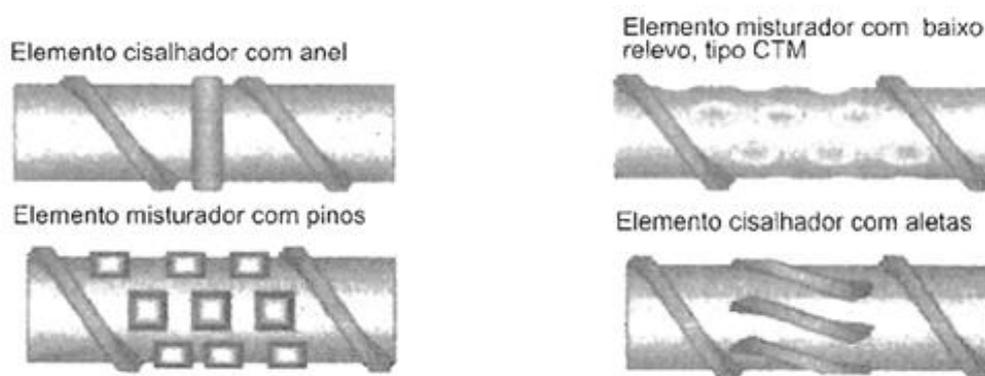


Figura 10 – Ilustração de alguns elementos de rosca única que podem ser empregados para aumento da capacidade de plastificação de extrusoras. (Fonte: Adaptado de [3]).

3.5. Avaliação do grau de inchamento do extrudado (*IE*)

Conforme Manrich [3], a maioria dos polímeros apresenta algum grau de inchamento do extrudado quando emerge de uma matriz. Isso ocorre porque dentro da matriz o polímero está quente e fundido e, ao mesmo tempo, deformado devido ao fluxo cisalhante e convergente. No entanto, essa deformação é viscoelástica, isto é, ocorre recuperação parcial da deformação elástica recuperável, sendo parte desta efetuada ainda dentro da matriz [3]. Porém, uma outra parcela significativa somente será recuperada fora da matriz, causando o *IE*, uma vez que as moléculas poliméricas deformadas tendem a recuperar sua conformação.

Uma situação semelhante à descrita pode ser observada na Figura 11, a qual mostra o fluxo mássico do polipropileno emergindo pelos orifícios da matriz tripla acoplada ao cabeçote da extrusora em questão. É possível observar, mesmo a “olho nu”, que há uma diferença no diâmetro do perfil do extrudado quando se compara a região rente à saída da matriz com o restante dele.



Figura 11 – Detalhe da saída do polímero fundido pelos orifícios da matriz tripla. (Fonte: Autor, 2020).

Em seguida foram feitas as medições do grau de inchamento do extrudado dos filamentos obtidos e resfriados em água à temperatura ambiente (25 °C), sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 2. Para a determinação do grau de inchamento do extrudado (*IE*) em cada filamento polimérico foi empregada a Equação 01 [2], [3], na qual as incógnitas D_e e D_m correspondem, respectivamente, aos diâmetros do extrudado e da matriz capilar.

$$(IE) = \frac{D_e}{D_m} \quad (01)$$

Tabela 2 – Graus de inchamento do extrudado (*IE*) obtidos dos filamentos de polipropileno extrudados nas velocidades de 200, 300 e 400 rpm. (Fonte: Autor, 2020).

| Velocidade de rotação do parafuso sem-fim (rpm) | Diâmetro do extrudado (mm) | <i>IE</i> |
|---|----------------------------|-------------|
| 200 | 0,63 ± 0,03 | 0,42 ± 0,06 |
| 300 | 0,53 ± 0,01 | 0,35 ± 0,03 |
| 400 | 0,52 ± 0,03 | 0,34 ± 0,05 |

O gráfico da Figura 12 contribui para facilitar a visualização dos graus de inchamento do extrudado obtidos em função do aumento da velocidade de rotação do parafuso sem-fim. O aumento da taxa de cisalhamento, gerado pelo aumento da velocidade de rotação, até um determinado limite crítico, deveria resultar em aumento do *IE*, tal como bem discutido por Manrich [3]. Porém, neste caso, o que se observou foi, diferentemente, uma redução deste índice (passou de $0,42 \pm 0,06$ para $0,34 \pm 0,05$, quando a velocidade de rotação mudou de 200 para 400 rpm, respectivamente), sugerindo que as taxas de cisalhamento, nas condições aplicadas, foram provavelmente superiores ao valor crítico para este material, resultando assim nas reduções do *IE* verificadas.

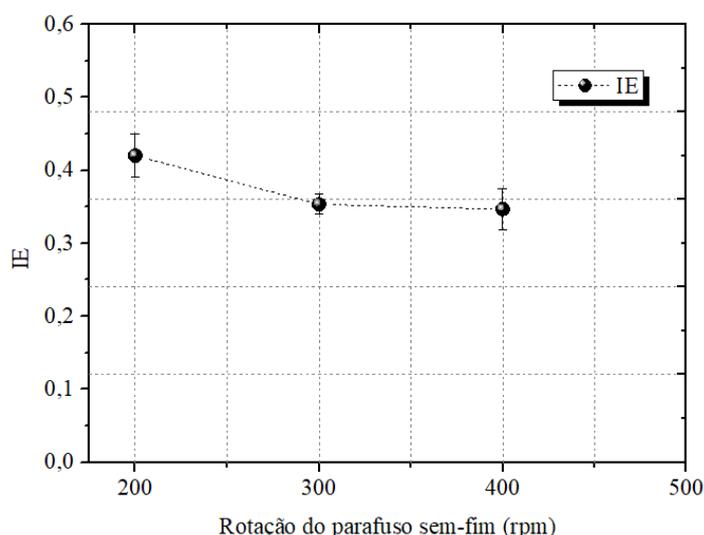


Figura 12 – Comportamento do grau de inchamento do extrudado em função do aumento da velocidade de rotação do parafuso sem-fim. (Fonte: Autor, 2020).

3.6. Diagnóstico do caráter pedagógico da atividade

Dado que este artigo foi fruto de uma atividade prática experimental de ensino em uma disciplina do curso de Especialização em Processamento de Plásticos e Borrachas do

IMA/UFRJ, é importante ressaltar e justificar o impacto gerado de sua aplicação na melhoria do processo de ensino e aprendizagem da turma.

Conforme Lôbo [16], o trabalho prático experimental no ensino de ciências, como a química, a biologia, a física e também a engenharia, para ser de fato eficiente, precisa contemplar três aspectos fundamentais da educação científica, descritos a seguir: aprender ciência, aprender sobre a ciência e fazer ciência. Neste contexto, o autor [16] explica que:

Aprender ciência significa se apropriar das suas teorias, princípios e modelos; aprender sobre a ciência requer o conhecimento do seu processo de produção, dos aspectos metodológicos e de validação de suas teorias; e fazer ciência, por sua vez, corresponde a desenvolver no aprendiz a prática investigativa, característica da atividade científica (p. 430).

Esses três aspectos mencionados são de fundamental importância no ensino superior de Química e de suas tecnologias correlatas, por exemplo, a ciência e tecnologia de polímeros, que é uma subárea que engloba conhecimentos aplicados de química orgânica (polímeros) e de engenharia de materiais (técnicas de processamento, técnicas de caracterização e aplicações industriais e tecnológicas de materiais). Assim, para um bom desenvolvimento do aprendizado, mesmo em nível de pós-graduação (especialização ou até de mestrado e/ou doutorado), onde o alunado já tem uma bagagem considerável de conhecimentos, estes aspectos apresentados por Lôbo [16] precisam estar bem articulados para atender às diferentes finalidades sociais da formação profissional em química, engenharia e áreas correlatas, ou seja, a de formação de professores, de pesquisadores; e também dos professores-pesquisadores, este último grupo que é geralmente o caso dos profissionais que atuam como docentes de ensino superior em universidades do Brasil e do mundo.

Contudo, Lôbo [16] chama a atenção para o fato de que, para qualquer um destes casos, isto é, seja na formação de professores ou de pesquisadores (e também dos professores-pesquisadores), o sentido da atividade experimental deve estar filosófica e pedagogicamente antenado com as questões contemporâneas relativas à educação científica, isto é, a tecnologia alinhada ao desenvolvimento humano e social feito de forma ambientalmente correta, sustentável, e voltada para o progresso da sociedade. Neste contexto, a aula prática, para ser bem desenvolvida e gerar um resultado verdadeiramente satisfatório, precisa superar um conjunto de fatores, os quais abrangem desde as limitações de infraestrutura física e de insumos, o nível de compreensão dos fenômenos pelos discentes (capacidade em relacionar teoria e prática) até a superação de obstáculos associados ao engessamento de currículos que ocorre em muitas instituições.

Dessa forma, é importante os gestores e chefes de departamentos, juntamente com a comunidade acadêmica, estarem sempre atentos a autorreflexão e a questionamentos acerca de propostas para a reorientação das aulas práticas, tais como estas destacadas por Lôbo [16]:

Que concepção pedagógica deve orientar o experimento? Qual a proposta do experimento? O que se quer enfatizar: a aprendizagem dos conceitos, a adequada manipulação dos equipamentos pelos alunos? Que conteúdos são relevantes? Qual o seu contexto de aplicação? Estas e outras questões são importantes para que as aulas experimentais tenham, realmente, uma função pedagógica no ensino de Química (p. 430).

Portanto, o presente trabalho foi de fundamental importância na formação dos estudantes dessa turma de pós-graduação, uma vez que foi possível ter acesso ao conhecimento prático associado ao conhecimento teórico acerca da transformação do polímero (polipropileno) durante o seu processamento pela técnica de extrusão com rosca única.

Adicionalmente, foi visto que o processamento dos plásticos está intrinsecamente associado a aspectos que abrangem desde à composição química e a estrutura molecular dos polímeros, seus métodos de separação e purificação, até à técnica de processamento em si, além de questões envolvendo a sociedade, o meio ambiente e o desenvolvimento industrial, tais como, poluição, sustentabilidade e formas de redução, reuso ou reciclagem, conforme discutido por Spinacé e De Paoli [26]. Dessa forma, esta atividade foi útil e beneficiou a todo o corpo discente da turma, o qual era de caráter multiprofissional e interdisciplinar, isto é, formada por químicos, pesquisadores, professores, cientistas e engenheiros de modalidades variadas.

4. CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho foi possível concluir, primeiramente, que o parafuso sem-fim exerce de fato um papel central no processamento dos polímeros pela técnica da extrusão. Sua rotação, além de gerar a maior parte do calor necessário para a plastificação do polímero sólido, transporta a massa fundida até a matriz. Esta, por sua vez, também tem um papel igualmente importante no processo, pois é ela que confere a forma final ao produto extrudado, ou seja, transforma o polímero em um objeto concreto, seja ele um perfil anelar (filmes tubulares e tubos), plano (chapas, filmes planos e fitas) ou assimétrico (rodapés, molduras e forros). No caso de matrizes capilares, como a deste trabalho, o produto final é um filamento polimérico cilindro e uniforme, o qual pode ser posteriormente picotado (peletizado) e reutilizado com matéria-prima em outros processos, tais como novas extrusões, moldagem por compressão ou transferência, injeção, rotomoldagem, entre outros.

A segunda conclusão foi que para o caso de polímeros muito pseudoplásticos, como este *grade* de polipropileno utilizado, aumentando a velocidade de rotação do parafuso sem-fim, ocorre aumento do cisalhamento no material, como esperado, porém, este maior cisalhamento não provoca aumento da viscosidade, mas sim redução desta, com conseqüente aumento da fluidez do material, resultando assim em aumento da produtividade do parafuso. Contudo, alguns cuidados devem ser tomados em relação ao tipo de material utilizado, em função das propriedades pseudoplásticas do mesmo. Se o material não possuir o grau de pseudoplasticidade adequada, o efeito da elevação da velocidade do parafuso sem-fim pode resultar em aumento excessivo do cisalhamento e da pressão, com conseqüente aumento da temperatura do processamento, de tal forma que poderá ocasionar degradação térmica do material, com conseqüente perda de suas propriedades fundamentais.

Por fim, é importante ressaltar, com relação ao caráter pedagógico, que o trabalho desenvolvido teve um alto impacto na melhoria do processo de ensino e aprendizagem do corpo discente, uma vez que a atividade foi muito bem planejada e conduzida com maestria pelos docentes, em um ambiente com infraestrutura laboratorial apropriada. Assim, além de complementar a conhecimento científico relativo ao processamento de polímeros por extrusão, a aula foi correta e adequadamente associada com os aspectos sociais acerca uso, destinação e reprocessamento dos materiais plásticos, envolvendo, portanto, questões relativas ao meio ambiente, ao desenvolvimento industrial humano e à sustentabilidade. Desta forma, esta atividade prática beneficiou de forma positiva a aprendizagem de toda a classe, mesmo que esta fosse composta por um público variado das áreas de tecnologia (engenheiros), exatas (pesquisadores) e ensino (professores licenciados).

5. REFERÊNCIAS

1. CHANDA, M. **Plastics technology handbook**. Boca Raton: CRC Press, 5th Edition, 2017.
2. BRETAS, R. S.; D'ÁVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. São Carlos: Editora EdUFSCAR, 2^a Edição, 2010.
3. MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos**. São Paulo: Editora Artliber, 2^a Edição, 2013.
4. ROCHA, M. C. G.; COUTINHO, F. M. B.; BALKE, S. Índice de fluidez: uma variável de controle de processos de degradação controlada de polipropileno por extrusão reativa. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 4, n. 3, pp. 33–37, 1994.

5. ARAÚJO, R. S.; PITA, V. J. R. R.; FARAH, M.; CANTO, L. B. **Propriedades reológicas do polipropileno linear e ramificado**. In: Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, PR, 2009. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/1155.pdf>>. Acessado em 04 de fevereiro de 2020.
6. SOARES, E. P; SILVA, P. M.; AGRAWAL, P.; MÉLO, T. J. A. **Efeito do índice de fluidez do polipropileno nas curvas de distribuição de tempos de residência em extrusora dupla rosca corrotacional**. In: 21º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, MT, 2014. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/403-018.pdf>>. Acessado em 04 de fevereiro de 2020.
7. DORNA, M. Z. **Estudo da degradação da poliamida 11 pela técnica de índice de fluidez (MFI)**. 2016. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2016.
8. AKCELRUD, L. **Fundamentos de ciência dos polímeros**. Barueri: Editora Manole, 1ª Edição, 2007.
9. CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Editora Artliber, 2ª Edição, 2002.
10. ALMEIDA, R. S. **Influência da velocidade de rotação no processo de extrusão do polipropileno virgem e reciclado**. 86 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, SP, 2010.
11. MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Editora Edgard Bluncher, 2ª Edição, 1999.
12. WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia: tecnologia e aplicações**. São Paulo: Editora Artliber, 2ª Edição, 2012.
13. BATALIOTTI, M. D. **Avaliação da degradação do polipropileno sob múltiplas extrusões com e sem antioxidante**. 2016. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Londrina, PR, 2016.
14. LUCAS, E. F., SOARES, B. G., MONTEIRO, E. **Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2001.
15. SILVA, A. J. J. Análise comparativa da curva de viscosidade e do índice de fluidez de dois grades de polipropileno utilizando reometria capilar. **Revista Sítio Novo**, v. 4, n. 3, pp. 97–108 2020.
16. LÔBO, S. F. O trabalho experimental no ensino de química. **Química Nova**, v. 35, n. 2, pp. 430–434, 2011.
17. CATELAN, S. S., RINALDI, C. Atividade experimental no ensino de ciências naturais: contribuições e contrapontos. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 1, 2018.

18. SALESSE, A. M. T. **Experimentação no ensino de química: importância das aulas práticas no processo de ensino aprendizagem.** 40 p. Monografia de Especialização, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Medianeira, PR, 2012.
19. FARIA, E. C. **Processamento de híbridos de amido de milho termoplástico/argila organofílica em extrusora dupla-rosca co-rotacional.** 100 p. Dissertação de mestrado, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
20. BLASS, A. **Processamento de polímeros.** Florianópolis: Editora UFSC, 2ª Edição, 1985.
21. LAGE, R. O. **Caracterização do polietileno reticulado por silano.** 67 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
22. SILVA, A. J. J., COSTA, M. F. Avaliação mecânica de materiais poliméricos utilizando indentação instrumentada (TII): Revisão de conceitos e estudo de caso. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 4, pp. 212–224, 2019.
23. SILVA, A. J. J., BERRY, N. G., COSTA, M. F. Structural and thermo-mechanical evaluation of two engineering thermoplastic polymers in contact with ethanol fuel from sugarcane. **Materials Research**, v. 19, n. 1, pp. 84–97, 2016.
24. CÁCERES, C. A., CANEVAROLO, S. V. Degradação do polipropileno durante a extrusão e a geração de compostos orgânicos voláteis. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 1, pp. 79–84, 2009.
25. BABETTO, A. C., CANEVAROLO, S. V. Efeito do tipo de elemento de rosca na degradação de polipropileno durante múltiplas extrusões. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 2, pp. 90–99, 2000.
26. SPINACÉ, M. A. S., DE PAOLI, M. A. A Tecnologia de reciclagem de polímeros. **Química Nova**, pp. 62–65, 2007.