

## Simulação Computacional da Distribuição de Tempo de Residência e dos Parâmetros de Energia em uma Extrusora Dupla Rosca Corrotacional

E. P. Soares<sup>1\*</sup>, M. P. Silva<sup>1</sup>, P. Agrawal<sup>1</sup>, E. L. Canedo<sup>1</sup>, E. M. de Araújo<sup>1</sup>, T. J. A. Mélo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB, CEP 58429-900

(Recebido em 10/06/2016; revisado em 10/04/2017; aceito em 31/03/2017)  
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

A previsão de todos os parâmetros que envolvem o processo de extrusão permite alterar e modificar mais rapidamente a qualidade do material processado; como também manter um maior controle das variáveis envolvidas no processo, o que de forma geral possibilita melhorar o desempenho e a eficiência do mesmo. Este trabalho teve como objetivo utilizar um software computacional para simular as curvas de distribuição de tempos de residência (DTR) com as condições operacionais em uma extrusora dupla rosca corrotacional de modo a realizar a comparação com os dados medidos experimentalmente e estabelecer um grau de concordância entre os resultados. Com os resultados obtidos foi possível validar a simulação computacional como ferramenta útil no estudo do processamento de polímeros por extrusão.

**Palavras-chave:** Extrusão; Simulação Computacional; Curvas DTR; Parâmetros de energia.

### Abstract:

The prediction of all the parameters that involve the extrusion process allows not only to quickly change and modify the quality of the processed material, but also to maintain greater control of the variables involved in the process, which generally makes possible to improve the performance and efficiency of the same. The aim of this work is to use computer software to simulate the residence time distribution (RTD) curves with the operating conditions in a co-rotational twin screw extruder and compare the simulated results with the ones obtained experimentally and establish a degree of agreement between these results. With the obtained results it was possible to validate the computer simulation as a useful tool in the study of polymer processing by extrusion.

**Keywords:** Extrusion; Computer Simulation; RTD curves; Energy Parameters.

## 1. Introdução

Ao longo dos últimos anos a extrusora de dupla rosca corrotacional, tornou-se um dos principais equipamentos de processamento de polímeros, principalmente devido à facilidade de configuração do barril e a flexibilidade no projeto da rosca. O que levou este equipamento a ser utilizado em processos especiais, tais como: degradação controlada, mistura reativa, enxertia, desenvolvimento de blendas, compósitos, nanocompósitos poliméricos, etc; e não somente para misturar materiais e aditivos [1-2].

Entre os principais parâmetros de controle da extrusora com dupla rosca corrotacional pode-se citar o tempo de residência médio, a curva de distribuição de tempo de residência (DTR), que permite analisar e ajustar o desempenho de fluxo do processo de extrusão em tempo real e os parâmetros de energia que quantificam a eficiência energética do processo. Para determinar a curva de DTR geralmente se utiliza um método experimental baseado na técnica de impulso, onde uma quantidade de um material

(traçador) é alimentada na extrusora e sua concentração é medida através de uma função ao longo do tempo [3-4].

Desde a metade dos anos 80 se faz uso de programas de simulação de extrusão como ferramenta de auxílio, tanto no projeto de extrusoras quanto na otimização das condições de processamento. Estes softwares têm como objetivo a análise global do processo de extrusão em extrusoras monorosca quanto em extrusoras de dupla rosca. Estes simuladores variam em complexidade desde aqueles que utilizam simples modelos unidimensionais, com solução analítica que apreciam os estágios iniciais e finais do processo; até aqueles que utilizam modelos em três dimensões, com soluções numéricas (diferenças finitas, elementos finitos, etc.) [1]. No caso específico do processo de extrusão os métodos de modelagem e simulação podem ajudar a ampliar o estudo e análise do processo, bem como a aumentar a compreensão da complexa interação entre a geometria da rosca, as propriedades do material, eficiência energética, variáveis de processo, etc.[5-7].

\*Email: emanuel.pereira@ufcg.edu.br (E. P. Soares)

Desta forma, este trabalho tem como objetivo confrontar os resultados obtidos de curvas de DTR simuladas através de um software com os resultados obtidos por meio de medições in-line, de forma a validar os dados da simulação como ferramenta útil no estudo de processamento de polímeros.

**2. Experimental**

As medidas experimentais foram realizadas em uma extrusora dupla rosca corrotacional Werner-Pfleiderer Coperion - ZSK de 18 mm. Para a realização da simulação computacional foi utilizado um programa de simulação

unidimensional de extrusão WinTXS™ da PolyTech [8]. Tanto a simulação quanto a medição experimental foram realizadas utilizando como material de fluxo o polipropileno (PP) código H103 fornecido pela Braskem com IF = 40g/10 min. Já para o perfil de temperatura foi mantido constante a temperatura de 200°C para todas as zonas de aquecimento.

O sistema de detecção ótico utilizado neste trabalho para medir as curvas DTR em tempo real, foi o mesmo desenvolvido e utilizado em outros trabalhos [2,9], conforme esquema apresentado na Figura-1. O perfil de rosca utilizado encontra-se em outro trabalho desenvolvido pelos autores [9].

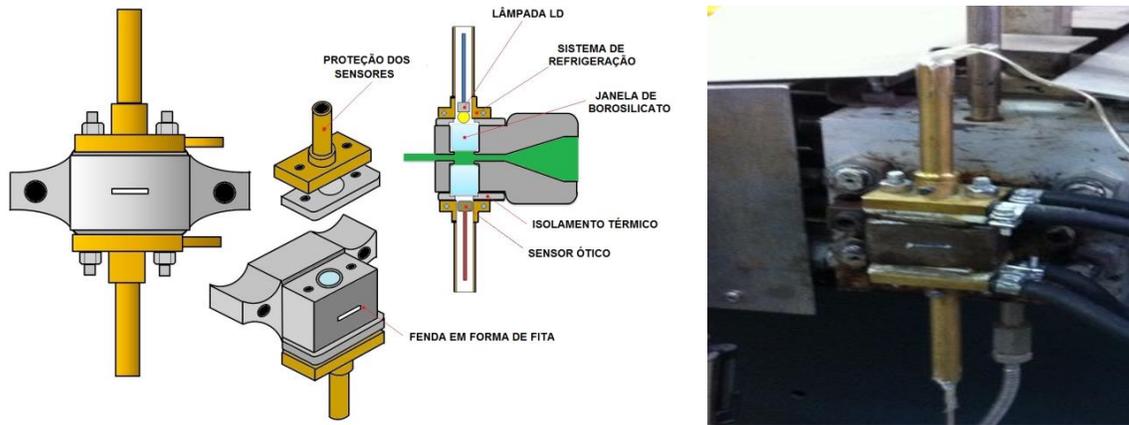


Figura 1. Sistema ótico utilizado para medir as curvas a DTR em tempo real na extrusora.

Para melhor avaliar a precisão do modelo utilizado pelo software foram modificadas as variáveis operacionais do equipamento (taxa de alimentação e a velocidade de rotação da rosca), conforme a Tabela 1.

Desta forma também é possível avaliar a capacidade do modelo utilizado pelo software de adaptação à variação das condições de processamento e a maneira como as curvas se comportam com relação a estas alterações.

Tabela 1. Variáveis operacionais

Condição	Taxa de alimentação	Velocidade da Rosca
1	4 Kg/h	200rpm
2	4 Kg/h	250rpm
3	4 Kg/h	300rpm
4	5 Kg/h	200rpm
5	6 Kg/h	200rpm
6	6 Kg/h	300rpm

Além da medição das curvas de DTR, também foram levantados os parâmetros temporais das curvas: tempo inicial (t<sub>i</sub>) e tempo médio (t<sub>n</sub>) para as condições medidas e simuladas. Os parâmetros de energia (energia mecânica dissipada e a energia mecânica específica) foram calculados por meio das equações 1 e 2 respectivamente:

$$W = 4\pi NZ \tag{1}$$

$$E_{\text{esp}} = \frac{W}{Q} \tag{2}$$

Onde: N é a velocidade de rotação das roscas (rpm); Z é o torque fornecido as roscas (Nm) e Q é a taxa de alimentação (kg/h). A energia mecânica dissipada é dada em kW e a energia mecânica específica em kWh/kg [1].

**3. Resultados e Discussão**

Na Figura 2 estão apresentadas as curvas de DTR (E(t)) experimentais para as condições de operação estabelecidas na Tabela 1 obtidas em tempo real com o sistema de detecção óptica desenvolvido. As curvas medidas experimental foram determinadas de acordo com a equação 3 abaixo:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \tag{3}$$

Onde: C(t) é a concentração do traçador no tempo correspondente.

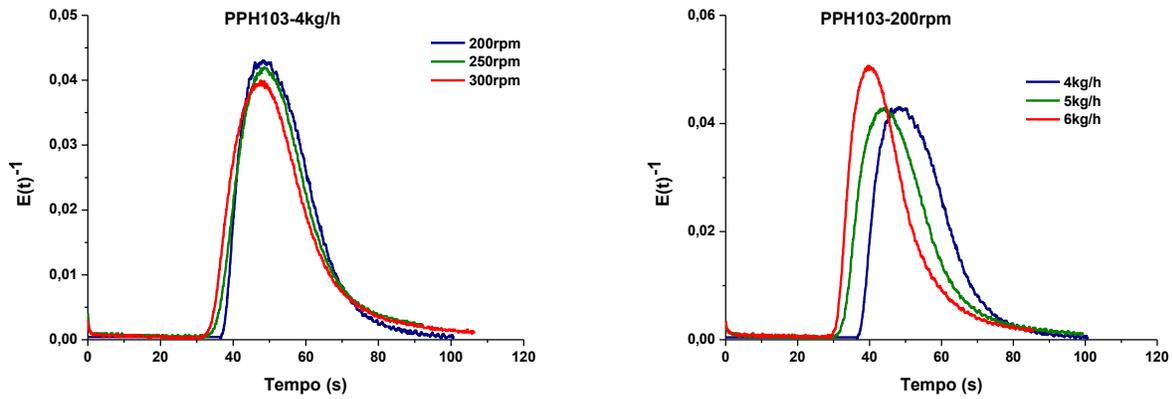


Figura 2. Curvas DTR e efeito das variáveis operacionais.

Apesar das mudanças das variáveis operacionais, observa-se que todas as curvas  $E(t)$  apresentaram comportamento e assimetria características de curvas típicas de DTR. As variações observadas nas curvas estão dentro das expectativas para cada condição estabelecida.

A partir das condições escolhidas é possível observar o efeito das variáveis de processo sobre as curvas de DTR medidas. Fica evidente que as alterações na taxa de alimentação são mais significativas do que as alterações na velocidade da rosca, este comportamento também foi observado em outros trabalhos [10-12].

As curvas de DTR simuladas através do software foram determinadas através das estimativas feitas pelo modelo de Bigio [13], conforme a equação 4:

$$G(t) = \frac{a^3}{2} e^{-a(t-t_d)} \tag{4}$$

Onde  $a$  é um fator de forma inverso ao tempo que é característico para cada região preenchida da extrusora e  $t_d$  o tempo de retardo ( $t_i$ ) que é estimado teoricamente. Na Figura 3 são comparadas as curvas DTR medidas e simuladas.

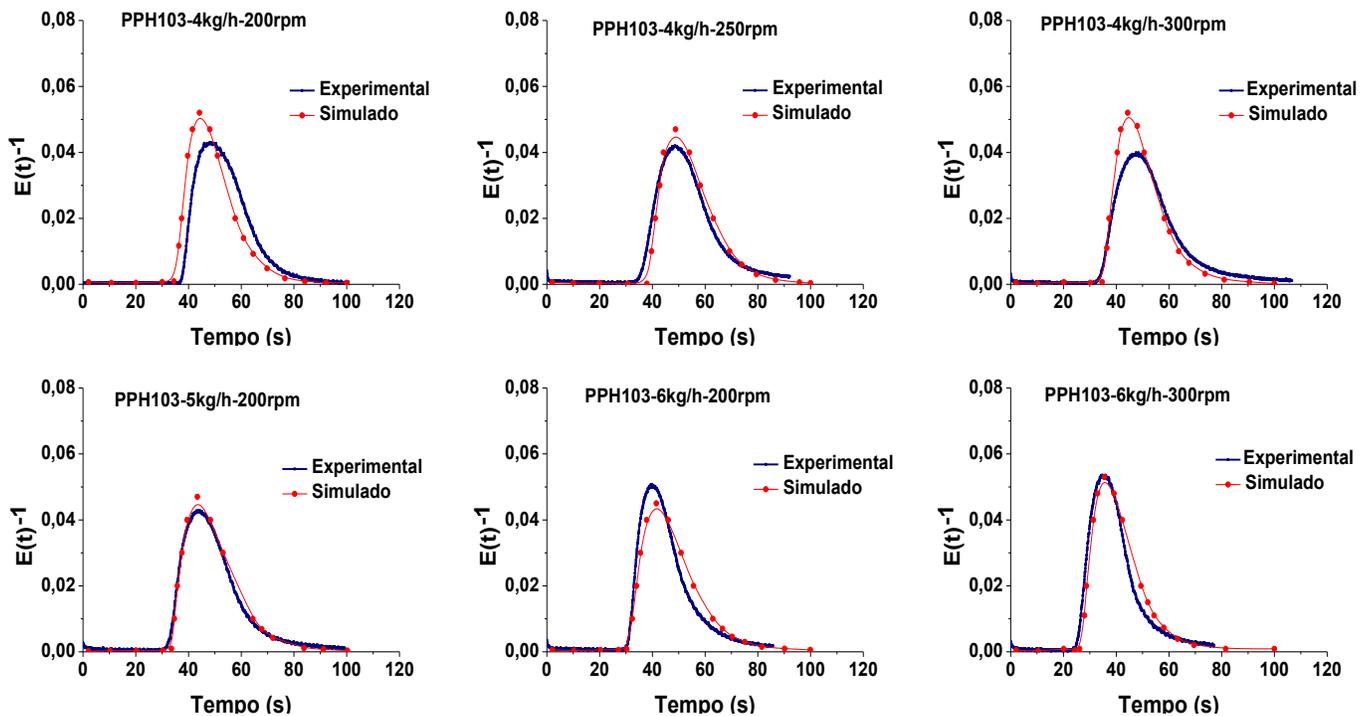


Figura 3. Curvas DTR medidas e simuladas para as condições de operação estabelecidas na Tabela 1.

É possível observar que as curvas de DTR simuladas apresentaram-se aproximadas na forma e na característica com as curvas experimentais, conforme as mudanças das variáveis operacionais. Desta forma, o modelo de Bigio utilizado pelo software apresentou boa concordância com os dados medidos.

Na Tabela 2 estão apresentados os dados dos parâmetros temporais obtidos das curvas de DTR para cada condição estabelecida.

Observa-se na tabela que os valores de tempo inicial ( $t_i$ ) e tempo médio ( $t_n$ ) medidos, encontram-se dentro das faixas de erro estabelecidas, ou melhor, a diferença entre os resultados está abaixo de 10%, o que pode ser considerado um resultado satisfatório, já que os valores medidos experimentalmente podem acumular erros provenientes de procedimentos manuais e os dados cedidos ao programa em parte são baseados em estimativas. Sendo assim, as variações ainda poderiam ser reduzidas com alguns ajustes operacionais no método de medição e nos dados inseridos no programa.

Tabela 2. Parâmetros Temporais das curvas de DTR.

	Tempo Inicial ( $t_i$ )		Tempo de Residência ( $t_n$ )	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado
4kg/h-200rpm	35,5 ± 1,2	33,2 ± 8,9	46,6 ± 1,4	48,7 ± 8,9
4kg/h-250rpm	35,9 ± 0,9	36,2 ± 9,8	48,0 ± 0,5	53,2 ± 9,8
4kg/h-300rpm	32,4 ± 0,8	33,4 ± 9,0	46,2 ± 1,1	49,0 ± 9,05
5kg/h-200rpm	32,5 ± 0,9	31,3 ± 10,0	44,1 ± 0,7	48,7 ± 10,0
6kg/h-200rpm	31,1 ± 1,2	28,8 ± 10,5	41,1 ± 1,4	46,8 ± 10,5
6kg/h-300rpm	24,4 ± 0,1	24,5 ± 8,8	33,6 ± 1,7	39,8 ± 8,8

Cabe também assinalar que na avaliação da distribuição de tempos de residência e, por conseguinte, nos cálculos dos tempos de residência inicial e médio, o software de simulação considera a câmara de processamento entre o extremo a jusante da porta de alimentação e o extremo do último elemento de rosca configurado – sem incluir o cone de entrada da matriz retangular (slit) do cabeçote, que não coincide exatamente com o segmento utilizado nas determinações experimentais (desde a porta de alimentação até o cabeçote de medição). A discrepância é pequena, mas pode ser

significativa, caso o volume ocupado entre o último elemento de rosca e o cabeçote não seja desprezível.

Na Tabela 3 é apresentado os parâmetros de energia para as condições de operação estabelecidas.

Os valores experimentais e simulados para as energias mecânicas dissipadas e energias mecânicas específicas são aproximados, o próprio software estima como valores aceitáveis aqueles que apresentam diferenças na ordem de ± 10%.

Tabela 3. Parâmetros de energia.

	Energia Dissipada (kW)		Energia Específica (kWh/kg)	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado
4kg/h-200rpm	0,358	0,340	0,0895	0,0840
4kg/h-250rpm	0,373	0,330	0,0932	0,0810
4kg/h-300rpm	0,447	0,370	0,1117	0,0940
5kg/h-200rpm	0,477	0,430	0,0954	0,0860
6kg/h-200rpm	0,517	0,520	0,0862	0,0870
6kg/h-300rpm	0,537	0,520	0,0895	0,0870

## Conclusão

Os resultados obtidos para as curvas de DTR bem como os parâmetros relacionados às curvas para todas as condições de operação apresentaram comportamento condizente com o

esperado teoricamente. Os resultados indicaram que os efeitos causados pela alteração da taxa de alimentação são mais expressivos do que os efeitos causados pela variação da velocidade de rosca, o que vem de encontro com o apresentado na literatura. As curvas  $E(t)$  simuladas pelo

programa com o modelo empírico de Bigio quando comparadas com as curvas medidas experimentalmente apresentaram um comportamento aproximado quanto às características de forma e distribuição axial. Os parâmetros temporais das curvas ( $t_i$  e  $t_n$ ) e as energias mecânicas dissipadas e específicas simuladas e medidas, encontraram-se dentro das faixas de erro aceitável.

A simulação computacional do processo de extrusão pode fornecer resultados que apresentam boa correlação e aproximação com os resultados medidos experimentalmente. Estes fatos colocam a simulação computacional como grande ferramenta para o desenvolvimento e avanço dos estudos que envolvem o processo de extrusão de material polimérico.

### Agradecimentos

A CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro e a Polytech pelo fornecimento do software WinTXS.

### Referências

- [1] Rauwendaal, C. Polymer Extrusion. Hanser Publishers 5th edition, Munich, 2013.
- [2] Mélo, T. J. A.; Canevarolo, S. V.. Org. Polymer Engineering and Science. 42,170; 2002.
- [3] Pinheiro, L. A.; Mélo, T. J. A.; Canevarolo, S. V. Org. Polímeros. 20,322, 2010.
- [4] Todd, D. B. Org.Polymer Engineering Science. 1975,15, 437.
- [5] Poulesquen, A.; Vergnes, B. A study of residence time distribution in co-Rotating twin-Screw extrudes. Part1: theoretical modeling. Polymer Engineering and Science.43,1841-1848, 2003.
- [6] Gujrati, P. D.; Leonov, A. I. Modeling and Simulation in Polymers, Wiley-VCH, 2010.
- [7] Osswald, T. A.; Hernández-Ortiz, J. P. Polymer Processing Modeling and simulation, Hanser Publishers, 2006.
- [8] POLYTECH, Twin-Screw Extruder Simulator (WinTXS) User Manual Version 3.0. Prospect CT (USA), 2009.
- [9] Freitas, B. R.; Agrawal, P.; Silva, M. P.; Soares, E. P.; Araújo, E. M.; Mélo, T. J. A. In Anais do 12º Congresso Brasileiro de Polímeros, Florianópolis, 1, 403-18, 2013.
- [10] Poulesquen, A.; Vergnes, B. A study of residence time distribution in co-rotating twin-screw extrudes. Part2: experimental validation. Polymer Engineering and Science.43, 1849-1862, 2003.
- [11] Dennis, H. R.; Hunter, D. L.; Chang, D. Effect of melt processing conditions on the extent of exfoliation in organoclay-based nanocomposites. Polymer Engineering and Science. 42, 9513-9522, 2001.
- [12] Piaux, J. P.; Bozga, G.; Ainsler, A. Residence time distribution in a corotating twin-screw extruder. Chemical Engineering Science. 55, 1641-1651, 2000.
- [13] Bigio, D.; Gao, J.; Walsh, G.; Briber, R.; Wetzel, M..Org. AIChE J. 45, 2541,1999.