

Monitoramento reológico on e in-line: uma revisão sistemática

Levy Moreira Cruz

Dávila Moreira

Zilda de Castro Silveira

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, USP

levymcruz@usp.br

Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sistemática com intuito de investigar as principais características dos sistemas de monitoramento reológico in/on line no processamento de materiais poliméricos por rosca em equipamentos de escala industriais, laboratoriais e equipamentos miniaturizados. O estudo é especialmente importante uma vez que cabeçotes baseados em rosca tem sido utilizados na Manufatura Aditiva (MA) como uma alternativa para a fabricação de uma ampla gama de materiais sem a necessidade de se tornarem filamentosos, um requisito da técnica *fused filament fabrication* (*fff*). Nesse contexto, investigar as tecnologias de monitoramento é uma importante aliada pra a otimização dos parâmetros de processo, assim como para a melhoria da qualidade do produto fabricado. Para isso, um método de busca foi desenvolvido com intuito de apurar os principais tipos de sensores utilizados e desenvolvidos, as regiões de instrumentação, e os parâmetros do processo controlados.

Método de Busca

A metodologia para formulação da revisão sistemática desenvolvida nessa pesquisa foi baseada, principalmente, nos estudos de Siddaway *et al.* (2018) e e Torres-Carrión *et al.*

(2018). Os principais parâmetros do métodos de busca podem ser visto na tabela 1.

Tabela 1 – Principais parâmetros do método de busca.

	Método de busca
Strings	1° - ("in line rheometer" OR "on line rheometer" OR "rheometer design") AND ("3D printing" OR "Extrusion" OR "Additive Manufacturing" OR "FFF" OR "Injection") 2° - ("In situ monitoring" OR "real-time monitoring" OR "continuous monitoring") AND ("polymer injection process" OR "fused filament fabrication")
Base de dados	Scopus, ScienceDirect e Web of Science.
Período de busca	2000 a 2021 (acontecimentos-chave: expiração da patente depositada pela Stratasys, FDM® em 2007)

Como resultado do método de busca, aplicado os filtros devidos e detalhados no artigo estendido, 27 estudos originais foram filtrados e analisados, conforme os resultados.

Resultados

Os resultados do estudo foram apresentados em dois grupos. O primeiro relativo a sistemas de extrusão convencionais, já o segundo é relacionado a sistemas miniaturizados.

Os tipos de reômetros mais usados são capilar, fenda, fenda dupla, fenda hiperbólica e personalizado. As propriedades de interesse são aquelas que afetam o fluxo do material, sendo algumas delas: a taxa de cisalhamento,

que é proporcional à velocidade de rotação da rosca da extrusora; a temperatura e pressão ao longo do processo, e os parâmetros mecânicos de entrada.

Coogan e Kazmer desenvolveram sensores para mensurar as propriedade relógicas, os quais são inseridos no cabeçote de uma impressora convencional 3d e, de forma a viabilizar o projeto, foram processados diferentes materiais como Policarbonado e Poliestireno de alto impacto e comparado os resultados dos sensores com reômetros capilares fora do processo. Foi avaliado que as propriedades adquiridas pelos sensores foram mais próximas às calculadas do que as informações dos reômetros.

Botner et al. (2019), trabalhando no desenvolvimento de uma impressora convencional instrumentada (FDM) para medir propriedades reológicas durante a extrusão. Um bico ("nozzle") personalizado a partir de um convencional (0,4 mm de diâmetro) é combinado com um sensor de pressão absoluta (modelo Meggitt) e um termopar tipo K, ambos localizados próximos à abertura. Pode-se inferir que quando não devidamente calibrado, o sistema de controle de temperatura afeta diretamente o comportamento da pressão ao longo da extrusão, sendo que a pressão calculada pelos métodos matemáticos da teoria dos fluidos e lei de potência é menor do que através do transdutor.

Dado a reunião dos conceitos adquiridos na RBS foi elaborada a primeira versão do projeto de instrumentação do cabeçote, como pode ser visto na figura 1 abaixo.

Considerações Finais

Baseado nos principais resultados observou-se que:

- A instrumentação em processos de extrusão e injeção influencia diretamente no fluxo polimérico, o que interfere na aferição das propriedades medidas. Para isso, alguns projetos estabeleceram locais ótimos para posicionar os sensores de forma a interferir menos no fluxo.

- A redução da escala dos maquinários incidiu problemas reológicos não solucionados pelas formulações matemáticas conhecidas na literatura (como a correção de Bagley). Deste modo, alguns autores desenvolveram métodos matemáticos empíricos para preencher os vazios deixados pelos problemas reológicos desconhecidos.
- Outro problema oriundo da instrumentação em maquinários miniaturizados é o alto custo associado aos sensores de dimensões milimétricas.

Referências

- COOGAN, T. J.; KAZMER, D. O. In-line rheological monitoring of fused deposition modeling. *Journal of Rheology*, v. 63, n. 1, p. 141–155, jan. 2019.
- RAPS, D. et al. Rheological behaviour of a high-melt-strength polypropylene at elevated pressure and gas loading for foaming purposes. *Rheologica Acta*, v. 56, n. 2, p. 95–111, 27 dez. 2016.
- RIPPL, A. et al. Simultaneous determination of shear and extensional viscosities and wall slip by on-line rheometry with parameter fitting: an application to EPDM rubber. *Rheologica Acta*, v. 46, n. 6, p. 847–860, 25 jan. 2007.
- TEIXEIRA, P. F. et al. A new double-slit rheometrical die for in-process characterization and extrusion of thermo-mechanically sensitive polymer systems. *Polymer Testing*, v. 66, p. 137–145, abr. 2018.
- MCAFEE, M.; MCNALLY, G. Real-time measurement of melt viscosity in single-screw extrusion. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, v. 28, n. 5, p. 481–497, dez. 2006.
- KLOZIŃSKI, A. The application of an extrusion modular slit head of a special construction in the in-line extensional viscosity measurements of polymers. *Polymer Testing*, v. 73, p. 186–192, fev. 2019.
- LUGER, H.-J. et al. A novel hyperbolic slit contraction with constant strain rate for elongational rheology of polymer melts. *Polymer Testing*, v. 73, p. 104–114, fev. 2019