

PROTÓTIPO PARA PROCESSOS DE ROTOMOLDAGEM COM INCREMENTO DE SEÇÕES DE PRÉ E PÓS-CÂMARA DE AQUECIMENTO: PARTE 2 - ANÁLISE DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES FÍSICAS DO MATERIAL

João Batista Regis Pires (IFBA) joabatistaregispres@gmail.com
João Erivando Soares Marques (IFBA) joaoerivando@yahoo.com.br
Márcio André Fernandes Martins (UFBA) marciomartins@ufba.br

Resumo

Este trabalho trata com a segunda parte do protótipo proposto de rotomoldagem baseado no incremento de seções de pré e pós-câmara de aquecimento. A primeira parte focalizou os ganhos energéticos e de produção com o protótipo proposto, ao passo que este artigo centraliza-se na avaliação das propriedades físicas do material, de modo a validar o processo de rotomoldagem com o equipamento desenvolvido. Uma análise comparativa das principais propriedades físicas do material, tomando-se com base amostras obtidas do processo convencional e do processo proposto, é realizada através da avaliação das incertezas de medição de tais propriedades. Os resultados mostram que as propriedades físicas do material são ou metrologicamente iguais ou mesmo melhoradas com o processo de rotomoldagem proposto, o que demonstra a sua efetividade e potencialidade de substituição do processo convencional.

Palavras-chave: Processo de rotomoldagem. Propriedades físicas de materiais. Incerteza de medição.

1. Introdução

A rotomoldagem ou fundição rotacional é um processo de transformação termoplástica para a produção de peças ocas diversas como objetos de utilidade doméstica, peças automobilísticas, reservatórios, bonecas, brinquedos diversos, entre outros (REVYAKO; KHROL, 2010; BAUMER; LEITE; BECKER, 2014). A matéria prima usada na rotomoldagem é produzida a partir das poliolefinas, nas quais têm-se os materiais comuns como os polietilenos e os outros não comuns como: os polipropilenos, nylon, policarbonatos, plásticos polivinil plastificado, dentre outras commodities. Adicionalmente, peças do processo de rotomoldagem podem ser produzidas a partir dos biopolímeros, compostos pelo Ácido Polilático (PLLA) e Mater-bi,

podendo ser misturados com o Bis-etilhexil-ftalato (DEHP) e Polietileglicol (PEG) para reduzir a fragilidade (GRECO; MAFFEZZOLI; FORLEO, 2014).

O processo de rotomoldagem é essencialmente empírico, pois se baseia em resultados de testes práticos (RUBIO, 2016), de modo que o material produzido possui características próprias como paredes com espessuras uniformes e cantos ou dobras livres de tensões superficiais, além de cantos sem costura. No entanto, este processo convencional se caracteriza indesejavelmente pelo seu longo período de ciclo de produção e desperdício de energia térmica no final de cada ciclo, onde parte do calor é transferido para o meio externo (PISANU, 2008). A primeira parte do presente trabalho apresentou uma arquitetura de protótipo de um novo processo de rotomoldagem que incorpora seções de pré e pós-câmara de aquecimento ao processo convencional. Se, por um lado, no artigo associado à primeira parte, demonstrou-se experimentalmente que o novo arranjo do processo de produção por rotomoldagem é capaz de incrementar produtividade ao processo, por diminuir o tempo de ciclo de operação e aproveitar a energia térmica usada, por outro lado, é preciso demonstrar que este novo processo pode manter ou mesmo melhorar as propriedades físicas do material produzido, de modo a não apenas validar o teste de conceito associado ao protótipo proposto, mas também promovê-lo a etapas subsequentes de concepção e disponibilização de produto de natureza inovadora, tais como cabeça-de-série e *scale up*.

Em face do exposto, este artigo, segunda parte do trabalho proposto, apresenta os resultados que dizem respeito às propriedades físicas das peças produzidas em cada processo produtivo (convencional e proposto), para demonstrar as melhorias das principais propriedades das peças produzidas pelo protótipo, para isso, tomando como base de estudo, os testes e ensaios mecânicos, tratamento estatístico dos resultados e análise de incerteza de medição, utilizando a norma ISO-GUM, a partir de amostras produzidas com o protótipo, operando nos modos com as seções de pré e pós-câmara de aquecimento, e comparando-os com o processo no modo de operação convencional na qual é comercializada no mercado.

2. Materiais e métodos

A metodologia utilizada consistiu na produção de cinco peças rotomoldadas, para realização dos experimentos, com o equipamento operando em três modos: convencional, pré e pós-câmara de aquecimento com controlador não acionado (modo *off*) e com controle acionado (modo *on*). Na sequência, realizados os ensaios e testes dos corpos de prova em laboratório, o

tratamento estatístico dos resultados das amostras, bem como a avaliação das incertezas de medição seguindo a norma reconhecida internacionalmente para tal tarefa *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) (BIPM et al., 2011), tem sido realizada. As propriedades avaliadas do material foram: densidade-porosidade, espessura da parede e resistência à tração. O critério utilizado na tomada de decisão foi baseado em um nível de confiança de 95%.

A operação do equipamento foi feita nos três modos descritos anteriormente, de modo que no convencional, a fonte de calor é desligada, tendendo a perder calor ao término de cada ciclo; e pré e pós-câmara de aquecimento com controlador não acionado (modo *off*) e com controle acionado (modo *on*), na qual a fonte de calor entra em operação, mantendo a temperatura de set point de 270° C, mesmo após terminado o ciclo, contudo, não impede a transferência de calor para as seções de pré e pós-câmara, o que conseqüentemente causa e perda temperatura ao término de cada ciclo.

Para a produção das peças, foi utilizado o Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD) (RC35U4). Este material apresenta densidade na faixa de 0,925 a 0,940 g.cm⁻³ de características similares ao polietileno linear de baixa densidade (PISANU, 2008). O procedimento de coleta de dados deu-se primeiro com o condicionamento das amostras do pó de polietileno de forma homogênea, sendo pesadas individualmente em balança de precisão em gramas com quatro casas decimais. Posteriormente, foi feito um levantamento das densidades, espessuras e resistências à tração, a partir das cinco peças produzidas em cada processo.

3. Resultados e discussão

Os dados utilizados e a análise das propriedades físicas das amostras nos três modos de operação (modo convencional e proposto) são ilustrados nas subseções que seguem correspondentes a cada teste realizado.

3.1. Densidade

As tabelas 1 e 2 mostram os resultados dos ensaios e as incertezas de medição associadas a densidade das peças produzidas em cada modo de operação.

Para uma primeira análise, a partir da tabela 1, observa-se que a densidade das amostras varia naturalmente às condições experimentais não serem mantidas exatamente. No entanto, devido ao modo de operação com controlador ligado (modo *on*) manter a temperatura constante, ou próxima ao valor desejado, uma menor variação dos valores da densidade é observada, demonstrando sua efetividade em manter o processo de produção em condições mais estáveis possíveis.

Tabela 1 - Resultados associados aos dados experimentais da densidade para os três modos de operação

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Processo convencional					
Massa (g)	60,2900	60,8263	61,0459	61,9515	60,8144
Densidade (g/cm ³)	0,8838	0,9179	0,9230	0,9285	0,8426
Processo proposto modo <i>off</i>					
Massa (g)	61,8049	59,9785	61,8527	61,216	60,5727
Densidade (g/cm ³)	0,8561	0,9487	0,9330	0,9215	0,9330
Processo proposto modo <i>on</i>					
Massa (g)	60,0533	62,9265	61,6922	62,7231	61,8238
Densidade (g/cm ³)	0,9150	0,9337	0,9036	0,9282	0,9140

Fonte: Próprio autor.

Para uma segunda análise, observando-se a tabela 2, fica evidente a sobreposição dos intervalos metrológicos das densidades para os três modos de operação, sendo possível inferir que os processos são estatisticamente iguais. Vale ressaltar ainda que as incertezas em cada modo de operação abarcam o intervalo de abrangência fornecido pelo fabricante do polietileno usado, mostrando que a factibilidade experimental não apenas do processo convencional, mas também do processo proposto.

Tabela 2 - Resultado incerteza de medição das densidades

Modo de operação	Média (g/cm³)	Incerteza expandida (g/cm³)	Intervalo de abrangência
Convencional	0,8991	0,0776	[0,8215 - 0,9767]
Modo <i>off</i>	0,9185	0,0779	[0,8406 - 0,9964]
Modo <i>on</i>	0,9189	0,0690	[0,8499 - 0,9879]

Fonte: Próprio autor.

3.2. Teste de espessura

Sabe-se que um dos grandes desafios da rotomoldagem é manter a uniformidade de espessura de parede de suas peças. A tabela 3 mostra a média dos valores de espessuras das cinco amostras produzidas nos três modos operacionais, associados aos resultados experimentais dessa propriedade física do material.

Tabela 3 - Resultados associados aos dados experimentais da espessura para os três modos de operação

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Processo convencional					
Massa (g)	60,2900	60,8263	61,0459	61,9515	60,8144
Médias (mm)	1,6563	1,6468	1,6873	1,6642	1,6495
Processo proposto modo <i>off</i>					
Massa (g)	61,8049	59,9785	61,8527	61,2160	60,5727
Médias (mm)	1,6447	1,6168	1,7268	1,4789	1,5452
Processo proposto modo <i>on</i>					
Massa (g)	60,0533	62,9265	61,6922	62,7231	61,8238
Médias (mm)	1,7111	1,7531	1,7847	1,7673	1,9712

Fonte: Próprio autor.

A partir da tabela 3, é possível observar que as espessuras se mantiveram estáveis em todas as amostras. Ao analisar as incertezas descritas na tabela 4, observa-se sobreposição dos intervalos metrológicos para os três modos de operação, com um menor intervalo sendo referente ao modo *on*, apesar de incluir um possível ponto outlier da amostra 5.

Tabela 4 - Resultado incerteza de medição das espessuras

Modo de operação	Média (mm)	Incerteza expandida (mm)	Intervalo de abrangência
Convencional	1,6608	0,3282	[1,3326 – 1,9890]
Processo proposto modo <i>off</i>	1,6025	0,4129	[1,1896 – 2,0154]
Processo proposto modo <i>on</i>	1,7974	0,2327	[1,5647 – 2,0301]

Fonte: Próprio autor.

3.3. Ensaio de tração

Os testes de tração foram realizados para avaliar os efeitos sobre a propriedade física de resistência à tração, embora resultados de outras propriedades físicas do material sejam mostradas para os três modos de operação, sumarizados na tabela 5.

Para uma primeira análise da tabela 5, é possível verificar um aumento estável e crescente da resistência à tração no modo de operação com pré e pós-câmara com controle ligado (*on*). A tabela 6 mostra os valores médios de tração e análises das incertezas das cinco amostras produzidas nos três modos operacionais. Os resultados associados da incerteza demonstram que o método proposto, principalmente com o modo *on* de operação, não interfere negativamente na propriedade física tração em relação ao processo convencional, dado que há sobreposição dos intervalos metrológicos.

Tabela 5 - Resultado do teste de tração nos três modos: Convencional

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Tração, (N)	672,1000	687,0000	730,3000	682,7000	713,7000
Média da tração, (N)	697,1600	697,1600	697,1600	697,1600	697,1600
Deformação, (mm)	3,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
Força máxima, (N)	671,0000	688,0000	730,0000	683,0000	714,0000
Módulo de Young, (F/A)	14,9300	13,9000	15,7000	15,7000	16,4100
Pré e pós-câmara de aquecimento com controlador desligado (<i>off</i>)					
Tração, (N)	643,0000	730,3000	730,3000	568,2000	511,3000
Média da tração, (N)	636,6200	636,6200	636,6200	636,6200	636,6200
Deformação, (mm)	3,0000	4,0000	4,0000	3,0000	3,0000
Força máxima, (N)	643,0000	730,3000	730,3000	789,8000	736,2000
Módulo de Young, (F/A)	16,4900	18,0300	18,7300	23,6800	21,3100
Pré e pós-câmara de aquecimento com controlador ligado (<i>on</i>)					
Tração, (N)	662,8000	776,6000	729,0000	789,8000	736,2000
Média da tração, (N)	738,8800	738,8800	738,8800	738,8800	738,8800
Deformação, (mm)	3,0000	4,0000	3,0000	4,0000	4,0000
Força máxima, (N)	662,8000	777,0000	729,0000	789,8000	736,2000
Módulo de Young, (F/A)	13,8100	14,4000	15,1900	15,0400	15,3400

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 - Resultado incerteza de medição de tração

Modo de operação	Média (N)	Incerteza expandida (N)	Intervalo de abrangência
Convencional	697,1600	29,4701	[672,1000 – 730,0000]
Pré e pós - câmara <i>off</i>	636,6200	119,6454	[516,9746 – 756,2654]
Pré e pós - câmara <i>on</i>	738,8800	61,0655	[677,8145 – 799,9455]

Fonte: Próprio autor.

4. Conclusão

Os processos convencionais de produção de rotomoldados possuem longos períodos de ciclo, gerando desperdício energético significativo no processo produtivo. Diante dos dados obtidos experimentalmente, é possível verificar de forma geral que não houve efeito sobre significativo nas principais propriedades físicas estudadas. Ademais, o arranjo arquitetônico da câmara com controle ligado (*on*) proporciona resultados mais desejados de resistência à tração em comparação ao modo de operação convencional. Com isso, a partir dos resultados preliminares deste trabalho podem-se constatar as observações como segue.

- A densidade sofreu menos variações com a utilização das seções de pré e pós-câmara modo *on*, no entanto, nos testes de incerteza não se verifica diferença com o modo convencional, assegurando sua validade em termos preservação dessa propriedade física do material.
- A média das espessuras no modo *on* do processo com pré e pós-câmara teve uma leve melhoria, comparado aos demais modos operacionais, menor dispersão dos valores experimentais, garantindo-lhe estabilidade. Esta propriedade está diretamente correlacionada com falhas mecânica como folga no mecanismo de rotação biaxial, uniformidade no tamanho do grão utilizado como matéria-prima e parâmetros operacionais como temperatura, velocidade de rotação biaxial e tempo de exposição ao calor durante o processo;
- A resistência à tração aumentou pontualmente no processo proposto, modo *on*, o que permite o material com uma maior resistência elástica, tornando-o mais resistente a deformações reversíveis.

Referências

ARRUDA FILHO, A. B. de. **Placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal**. 2015. 108p. Mestrado (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

BAUMER, M. I.; LEITE, J. L.; BECKER, D.. 2014. Influence of calcium carbonate and slip agent addition on linear medium density polyethylene processed by rotational molding. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 130-37, 2014. doi: 10.1590/S1516-14392013005000159

BIPM et al. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)**. 2011. Disponível em: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>. Acesso em: 13 maio. 2020.

DODUN, O. et al. A preliminary study on the rotational molding process. **Proceedings in Manufacturing Systems**, v. 7, n. 1, 2012.

GONZÁLEZ-NÚÑEZ, R. et al. Thermal Analysis of Foamed Polyethylene Rotational Molding Followed by Internal Air Temperature Profiles. **Polymer Engineering & Science**, p. 1704-82, 2017. doi: 10.1002/pen.24725.

GRECO, A.; MAFFEZZOLI, A.; VLACHOPOULOS, J. Simulation of Heat Transfer during Rotational Molding. **Advances in Polymer Technology**, v. 22, n. 4, p. 271-79, 2003.

HAMIDI, A. et al. Modelling of Sintering during Rotational Moulding of the Thermoplastic Polymers. **International Journal of Material Forming**, v. 9, n. 4, p. 519-30, 2016. doi: 10.1007/s12289-015-1239-6.

PISANU, L. **Influência do polietileno reciclado nas propriedades de peças obtidas pelo processo de rotomoldagem**. 2008. p.123. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

REVYAKO, M. M.; KHROL, E. Z. Certain Problems of heat and mass transfer in rotational molding. **Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, v. 83, n. 5, p. 1089-92, 2010.

RUBIO, E. Innovative wireless technologies for real-time rotational molding processes optimization. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 1, p. 78-82, 2016.