

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLIPROPILENO UTILIZANDO A FERRAMENTA O PROJETO DE EXPERIMENTOS

Palova S. Balzer¹; Claudio Borges de Oliveira ; Uilson Carvalho Jr.; Fabio A. Busato²; Carlos M. Sacchelli³; João Batista Rodrigues Neto⁴
Sociedade Educacional de Santa Catarina/Instituto Superior Tupy
Rua Albano Schimidt, 3333 – CEP 89201-972 – Joinville, SC, Brasil
palova@sociesc.com.br¹, busato@sociesc.com.br², sacchelli@sociesc.com.br³,
batista@sociesc.com.br⁴

Resumo. *A aplicação da estatística não está concentrada apenas na análise de dados, mas também na realização do planejamento dos experimentos, no qual os dados são obtidos. Todo conjunto de experimento que não tem a estatística aplicada de forma apropriada como ferramenta, está sujeito a resultados com um número de informações muito elevado, tornando difícil projetar qualquer conclusão de forma eficiente. Neste trabalho utilizou-se a técnica do Planejamento e Análise de Experimentos como um método para identificar a influência dos parâmetros de regulagem do processo de injeção do polipropileno homopolímero, nas propriedades de tração e dureza. Como no planejamento de experimentos destacam-se os experimentos fatoriais, neste experimento, todos os fatores foram variados simultaneamente, resultando em diversas combinações. Devido ao grande número de combinações, empregou-se a técnica de fatorial fracionado, resultando em um total de 16 combinações. A análise dos resultados experimentais mostrou que apenas o parâmetro de tempo de recalque, influenciou na variável de deformação máxima. A condição de haver influência em apenas um parâmetro nos deixa uma interrogação quanto ao resultado obtido, pois dentre os fatores de controle determinados, conforme literatura, encontram-se fatores de maior impacto do que aquele evidenciado no experimento. Esta condição denota a possibilidade de a fração aplicada para o experimento (1/16) e o número de combinações (16 combinações) serem insuficientes para uma maior interação entre os parâmetros.*

Palavras-chave: *moldagem por injeção, projeto de experimentos, polipropileno.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente um dos processos de transformação mais empregados para a moldagem de materiais plásticos é a injeção. Esse fato se deve a possibilidade da fabricação de componentes de elevada complexidade geométrica com cores e tamanhos variados, baixo custo, grande volume e velocidade de produção¹. Essas características fazem com que este processo seja utilizado desde a indústria de utilidades domésticas até a aeronáutica. Isso é possível devido ao emprego dos termoplásticos, com os quais podem ser fabricados componentes de elevada resistência mecânica e baixo peso. Devido ao elevado investimento em moldes, máquinas injetoras, infra-estrutura e recursos humanos, as indústrias anseiam pela obtenção de alta produtividade aliada a um determinado nível de qualidade, o qual é definido pelo tipo de aplicação do moldado. Geralmente a alta qualidade demanda cuidados durante a fabricação do produto, fato este que reduz a produtividade do processo e encarece o produto final. Como o processo de moldagem por injeção é um

processo cíclico, que envolve vários parâmetros a serem regulados, como temperatura, pressões e velocidades de injeção entre outros, é de suma importância a utilização de equipamentos de boa qualidade assim como pessoal qualificado para a confecção do ferramental e para a regulagem e controle do processo de fabricação quando se deseja pequenos ciclos aliados a um determinado nível de qualidade².

O polipropileno (PP) é uma das mais importantes resinas termoplásticas da atualidade, estando hoje entre os mais consumidos do mundo. O PP é múltiplo por resistir bem a temperaturas moderadas e de fácil moldagem, apresenta boas propriedades mecânicas e destaca-se por seu baixo peso específico (0.9 g/cm^3), podendo ser utilizado na forma de compósitos e blendas³.

O DOE (*design of experiments*) ou projeto de experimentos, é um método estatístico que pode ser utilizado em várias áreas do setor produtivo e de projeto, com o objetivo de determinar qual a influência de um determinado parâmetro de processo ou de fabricação no produto final^{4,5}. Dessa forma, ele também pode auxiliar na identificação de quais parâmetros possuem maior influência sobre uma determinada característica a ser obtida pelo moldado. Neste caso, o DOE foi utilizado com o objetivo de determinar qual a influência de alguns parâmetros do processo de moldagem por injeção nas propriedades mecânicas do PP. Para tal, moldou-se os corpos de prova de tração em um molde com duas cavidades. Após a moldagem, os corpos de prova foram caracterizados pelos ensaios de tração e dureza. Os resultados destes ensaios foram inseridos no software Minitab, no qual gerou resultados que podem ser analisados através de gráficos específicos para cada propriedade.

Segundo Montgomery⁶, durante a realização de um DOE as condições de contorno são os fatores de controle que neste caso são os parâmetros de injeção; os fatores de resposta são as propriedades mecânicas de resistência à tração e dureza dos corpos de prova; os níveis do experimento são as variações máximas e mínimas atribuídas aos fatores de controle; as rodadas são as combinações dos fatores de controle; as réplicas indicam o número de repetições de uma mesma rodada; os fatores de ruído são aqueles sobre os quais não se tem completo controle, como a temperatura ambiente; o fatorial completo é o experimento onde são realizadas todas as possíveis combinações entre os fatores de controle e o fatorial fracionado é o experimento onde somente parte das possíveis combinações são realizadas para reduzir o número de rodadas e de amostras obtidas⁶.

2. EXPERIMENTAL

Para este trabalho foi empregado como matéria prima o polipropileno homopolímero da Polibrasil (Prolen VM 6.100K). Para a obtenção dos corpos de prova foi utilizado um molde com duas cavidades para o ensaio de tração, segundo a norma ISO 294-1 e uma máquina injetora Sandreto, modelo Micro 65, com 65 toneladas de força máxima de fechamento.

Foi utilizado o software estatístico Minitab – versão 13 Demo para a geração da matriz de experimentos e dos gráficos para a interpretação dos resultados. O desenvolvimento experimental foi realizado em uma única etapa. Os parâmetros analisados foram escolhidos aleatoriamente, sendo eles: temperatura de injeção e do molde, velocidade de injeção, pressão de injeção, pressão e tempo de recalque, tempo de resfriamento, velocidade da rosca. Os demais parâmetros como curso de dosagem, contrapressão e força de fechamento foram mantidos constantes durante a realização de todas as rodadas, exercendo a mesma influência sobre todo o experimento.

Baseado nos conceitos descritos anteriormente por Montgomery⁶, e considerando um experimento fatorial completo com oito fatores de controle, dois níveis e dez réplicas, totalizando duzentos e cinquenta e seis rodadas, correspondendo a um total dois mil e duzentos e cinquenta e seis corpos de prova a serem injetados, fato este que torna o experimento inviável. Dessa forma, optou-se por realizar um fatorial fracionado com 1/16 do experimento completo (ou seja, $2^{8-4} = 2^4$), totalizando dezesseis rodadas, que correspondem a um total de 160 corpos de prova a serem injetados. Para a definição do nível máximo e mínimo de cada fator de controle, decidiu-se inicialmente obter as condições de injeção para um corpo de prova referência. A Tabela 01 mostra os parâmetros de injeção tomados como referência, assim como os parâmetros máximos e mínimos dos fatores de controle.

Tabela 1. Parâmetros de injeção tomados como referência para este trabalho e os parâmetros mínimos e máximos dos fatores de controle.

Parâmetros	Valores obtidos	Mínimo (-1)	Máximo (1)
Temperatura de injeção (Ti)	210° C	150 ° C	225 ° C
Temperatura do molde (Tm)	29° C	29 ° C	35 ° C
Pressão de injeção (pi)	315 bar	180 bar	450 bar
Velocidade de injeção (vi)	25 cm ³ /s	10 cm ³ /s	76 cm ³ /s
Pressão de recalque (pr)	130 bar	85 bar	550 bar
Tempo de recalque (trecal)	9 s	5 s	25 s
Velocidade da rosca (vr)	150 rpm	50 rpm	288 rpm
Tempo de resfriamento (tresf)	11 s	4 s	20 s

Tendo definido os parâmetros de controle e seus níveis, partiu-se para a fase de alimentação do software Minitab para que o mesmo gerasse a matriz de experimentos de um fatorial fracionado com 1/16 do tamanho de um experimento fatorial completo. A Tabela 2, fornecida pelo software Minitab mostra as 16 rodadas do fatorial fracionado, indicando como deveria ser a configuração dos parâmetros de processo durante a injeção dos corpos de prova.

Tabela 2. Matriz de planejamento para realização do processo de injeção.

Ordem	Ti (°C)	Tm (°C)	pi (bar)	vi (cm ³ / s)	pr (bar)	t recal (s)	t resf (s)	vr (rpm)
1	150	29	180	10	85	5	4	50
2	225	29	180	10	85	25	20	288
3	150	35	180	10	550	5	20	288
4	225	35	180	10	550	25	4	50
5	150	29	450	10	550	25	20	50
6	225	29	450	10	550	5	4	288
7	150	35	450	10	85	25	4	288
8	225	35	450	10	85	5	20	50
9	150	29	180	76	550	25	4	288
10	225	29	180	76	550	5	20	50
11	150	35	180	76	85	25	20	50
12	225	35	180	76	85	5	4	288
13	150	29	450	76	85	5	20	288
14	225	29	450	76	85	25	4	50
15	150	35	450	76	550	5	4	50
16	225	35	450	76	550	25	20	288

Como seria inviável proceder à execução do experimento na ordem como segue na Tabela 2, devido às sucessivas mudanças do perfil de temperatura da unidade de injeção, optou-se por reagrupar as rodadas. A premissa para este ajuste foi à execução de todas as rodadas que possuíam o nível mínimo de temperatura e, em seguida os níveis máximos. Na seqüência, os demais fatores também foram agrupados de maneira a facilitar o experimento.

Após a realização das dezesseis rodadas do experimento, os corpos de prova foram climatizados segundo a norma ASTM 618. Após a climatização foi realizado o ensaio de dureza Shore D, segundo norma ASTM 2240 em um aparelho Wulstest SD 300 e o ensaio de tração segundo a norma ISO 572 na máquina universal de ensaios Kratos.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Após a realização dos ensaios, o software Minitab que já possuía a matriz de experimentos foi alimentado com os resultados obtidos nos ensaios de tração (resistência à tração e deformação máxima) e dureza (fatores de resposta) para que o gráfico de Pareto fosse gerado. Esse gráfico representa de forma clara quais os parâmetros de injeção possuem influência nas propriedades mecânicas analisadas. A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios mecânicos de tração e dureza realizados após a execução do experimento com a matriz de experimentos e o desvio padrão do ensaio de tração.

Tabela 3: Resultados dos ensaios mecânicos de tração e dureza realizados após a execução do experimento com a matriz de experimentos.

Ordem	Ti (°C)	Tm (°C)	pi (bar)	vi (cm ³ /s)	pr (bar)	trecal (s)	t resf (s)	v r (rpm)	Dureza Shore D (10s)	Tensão Máx. (Kgf/cm ²)	Def. Máx. (%)	Desvio Padrão Tensão Max	Desvio Padrão Def. Max
1	150	29	180	10	85	5	4	50	70,67	319,3	36,44	5,80	2,40
2	225	29	180	10	85	25	20	288	67,17	310,9	833,57	4,70	80,08
3	150	35	180	10	550	5	20	288	67	346,2	53,5	2,50	17,10
4	225	35	180	10	550	25	4	50	68,17	368,4	922,63	7,80	24,70
5	150	29	450	10	550	25	20	50	70	340,1	538,17	4,60	125,80
6	225	29	450	10	550	5	4	288	66,83	324,2	219,04	3,60	32,80
7	150	35	450	10	85	25	4	288	71	329,37	417,93	3,04	21,10
8	225	35	450	10	85	5	20	50	71,67	327,6	46,02	2,60	1,69
9	150	29	180	76	550	25	4	288	70,17	370,1	73,43	1,70	6,60
10	225	29	180	76	550	5	20	50	69,5	325,4	54,54	5,30	29,00
11	150	35	180	76	85	25	20	50	69,67	335,8	404,32	3,40	42,50
12	225	35	180	76	85	5	4	288	69,17	320,7	173,45	5,10	14,10
13	150	29	450	76	85	5	20	288	70,17	346,9	48,13	2,30	10,30
14	225	29	450	76	85	25	4	50	69,83	337,3	108,42	7,60	77,20
15	150	35	450	76	550	5	4	50	70,83	333,4	42,58	2,70	3,20
16	225	35	450	76	550	25	20	288	70	339,56	500,11	5,30	161,8

A Figura 1 mostram os gráficos de pareto para o resultados do ensaio de dureza shore D (Figura 1 (a)) e da resistência à tração (Figura 1 (b)). Como pode ser visto na Figura 1(a), os parâmetros de injeção não variaram significativamente e desta forma a linha de efeito (linha tracejada) não apareceu nesta Figura. Estes parâmetros já eram esperados já que a propriedade de dureza analisa apenas a superfície do material.

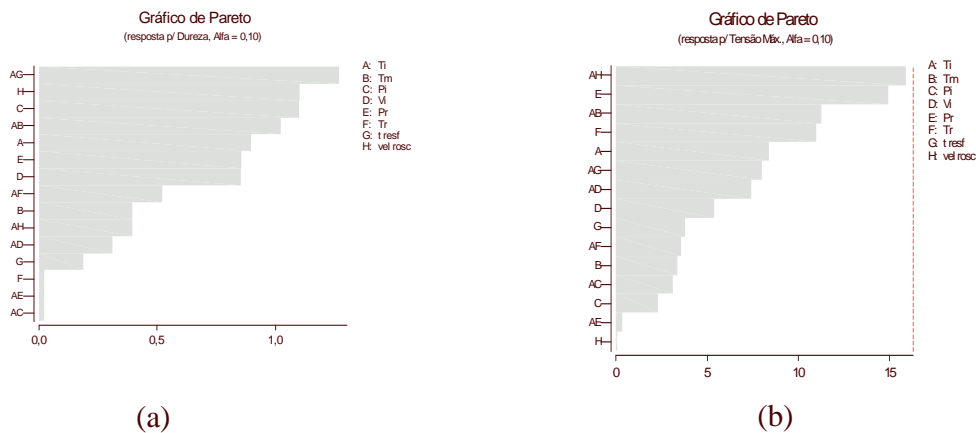


Figura 1. Gráfico de Pareto (a) Resultados obtidos através do ensaio de dureza Shore D. (b) Resultados referente à resistência à tração obtida através do ensaio tração.

O resultado de resistência à tração pode ser observado na Figura 1 (b) através do gráfico de Pareto, que não demonstra alterações significativas como na propriedade de dureza.

A Figura 2 (a) e (b) mostra o gráfico de probabilidade normal e o gráfico de pareto da deformação máxima (%). No gráfico de probabilidade (Figura 2 (a)) a linha média é a média desejada conforme tolerância estipulada em 10%. Os pontos próximos à linha demonstram que a variação dos fatores esteve dentro da tolerância, porém se observa que na Figura que o ponto F está distante da linha média. Esta condição demonstra que o fator F (tempo de recalque) influenciou diretamente na deformação máxima das amostras. A mesma condição se aplica na interpretação do gráfico de pareto na Figura 2 (b), onde o ponto F está deslocado da linha média.

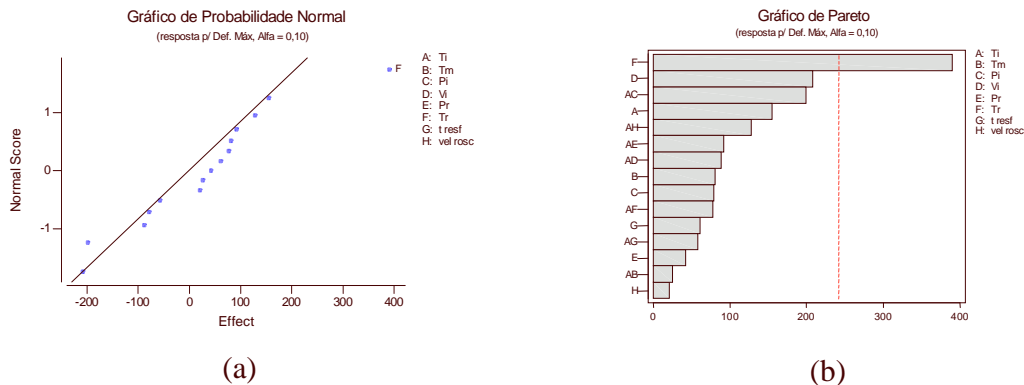


Figura 2. (a) Gráfico de probabilidade normal referente à deformação máxima obtida através do ensaio tração. (b) Gráfico de Pareto referente à deformação máxima obtida através do ensaio tração.

Com os resultados obtidos, observou-se que para este estudo, apenas o parâmetro tempo de recalque, influenciou na propriedade mecânica do material, especificamente na deformação máxima. O parâmetro de recalque é um dos parâmetros de fundamental importância visto que determina o nível de compactação do material no interior da cavidade da peça bem como o grau de cristalinidade. Analisando os gráficos de efeito (Figura 3),

com o aumento da pressão de recalque no valor máximo, constata-se um aumento da tensão em aproximadamente 5% e da deformação em aproximadamente 15%. Porém quando se verifica o tempo de recalque, do valor mínimo para o valor máximo de 25 segundos, ocorre um aumento na deformação máxima em aproximadamente 450%.

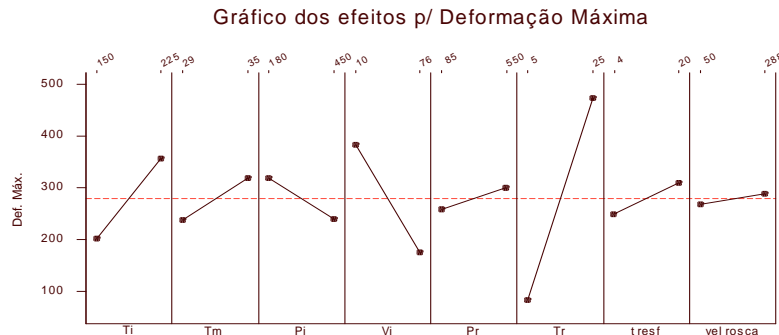


Figura 3. Gráfico de efeito da deformação máxima obtida no ensaio de tração.

4. CONCLUSÕES

Tendo em vista que este trabalho teve como objetivo fornecer informações básicas sobre o projeto de experimentos e sua aplicação no processo de moldagem por injeção, de forma a analisar entre alguns parâmetros previamente selecionados quais possuíam maior influência em suas propriedades mecânicas de corpos de prova injetados, conclui-se que a ferramenta (DOE) pode ser utilizada de forma a auxiliar na interpretação e escolha dos melhores parâmetros de processo quando se buscam características específicas para um componente moldado por injeção.

Os resultados obtidos mostraram que o parâmetro que influenciou na propriedade mecânica, especificamente na deformação máxima, foi o tempo de recalque. Os resultados obtidos nos demais parâmetros, não foram considerados relevantes conforme metodologia aplicada, apesar da literatura contradizer tal fato.

O tempo de recalque influencia diretamente na cristalização do material e na compactação deste na cavidade do molde. O aumento da deformação na condição máxima de 25 segundos de recalque permitiu uma maior compactação do material, possibilitando o agrupamento das moléculas em seu menor ponto de energia e um maior deslizamento das cadeias quando em deformação. Outros parâmetros como a temperatura de injeção, temperatura do molde, pressão de injeção e velocidade de injeção, afetam diretamente a cristalinidade do material, a orientação molecular, a densidade, o empacotamento do material e a taxa de cisalhamento também podem afetar, mas não foram analisados neste trabalho.

Acredita-se que estes fatores não foram evidenciados devido a fração utilizada com dezesseis combinações, não foi suficiente para uma interação entre os oito parâmetros e o real impacto destes nas propriedades estudadas.

Sugere-se que em futuros trabalhos a continuação do experimento seja realizada, alterando a fração utilizada para uma fração com maior número de combinações e ampliando a gama de propriedades mecânicas a serem analisadas como variável de resposta.

5. REFERÊNCIAS

1. RESS, H. **Mold engineering**. 1.ed. Munique: Hanser/Gardner, 1995.
2. F. A. BUSATO; C. M. SACCHELLI; P. S. BALZER. **Técnicas do Projeto de Experimentos na Análise da Influência dos Parâmetros de Injeção nas Propriedades Mecânicas do Polietileno de Alta Densidade**. In: Congresso de Materiais do Merco Sul, 2., 2004, Joinville. CD-ROM.
3. CORAZZA FILHO, Euclides Costacurta, *Termoplásticos: os materiais e sua transformação*. 4° ed. São Paulo: Plásticos em Revista Editora, 1995.
4. COCHRAN, W. G.; COX, G. M. **Experimental designs**. 2.ed. London, John Wiley & Sons, 1957.
5. CHEW, V. **Experimental designs in industry**. New York, John Wiley & Sons, 1957.
6. MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. Second Edition. John Wiley & Sons, 1983.

THE INFLUENCE OF THE INJECTION PROCESS PARAMETERS ON THE POLYPROPYLENE MECHANICAL PROPERTIES USING DESIGN OF EXPERIMENTS

Palova S. Balzer¹; Claubio Borges; Uilson Carvalho Jr.; Fabio A. Busato²; Carlos M. Sacchelli³; João Batista Rodrigues Neto⁴

Sociedade Educacional de Santa Catarina/Instituto Superior Tupy
Rua Albano Schimidt, 3333 – CEP 89201-972 – Joinville, SC, Brasil

palova@sociesc.com.br¹, busato@sociesc.com.br², sacchelli@sociesc.com.br³,
batista@sociesc.com.br⁴

Abstracts: The statistical approach it is not concerned only on the data analysis but also on experimental planning of the essay needed to obtain these data. Every time we don't use the statistical planning in a group of experiments we can have more variables than needed resulting difficulty to make efficient conclusion. In this work has been used the Experimental Analysis and Planning method to identify the influence of control parameters in the injection of homopolymer polypropylene on these hardness and tensile strength properties. In these experiments due the great number of variables the fractional factorial methods is preferred than the simple factorial resulting in 16 combinations. The analyze of results shown that only the hold time influenced on the maximum deformation. Results taken from the literature shown more parameters influencing the maximum deformation than that one founded on the experiments also more important than the hold time. Maybe is possible the fractional factorial used (1/16) and the number of correlation (16) are not sufficient for a perfect result so it could be necessary more of them.

Keywords: *injection molding, design of experiments, polypropylene.*