

MOLDES DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO: EFEITOS DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO MATERIAL DO MOLDE NOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO E PROJETO DO MOLDE

João Pedro Andrade Pereira

Sarah Gomes Araújo de Jesus

Evandro Menezes de Souza Amarante

Armando Sá Ribeiro Júnior

Universidade Federal da Bahia, R. Prof. Aristides Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, 40210-630, Brasil
joaopap@ufba.br; sarah.araujo@ufba.br; evandro.amarante@ufba.br; asrj@ufba.br

Cristiano Vasconcellos Ferreira

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88010-970, Brasil
cristiano.v.ferreira@ufsc.br

Valter Estevão Beal

SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador - BA, 41650-010, Brasil
valtereb@fieb.org.br

Resumo: No processo de moldagem por injeção de termoplásticos o polímero é introduzido em uma máquina injetora na qual é amolecido, injetado para o interior da cavidade do molde, compactado e resfriado até que atinja solidez necessária para a sua extração. Neste contexto, vale destacar que os parâmetros de injeção e as características do moldado (marcas de contração, linhas de solda, empenamento, etc) são fatores indispensáveis que devem ser observados para que a produtividade e os critérios de qualidade da peça sejam alcançados. Devido à alta resistência mecânica, boa estabilidade térmica e a possibilidade de realizar um acabamento superficial que os moldes necessitam, comumente, o material utilizado para a sua fabricação é o aço. Embora este material apresente estas vantagens, o aço apresenta uma baixa condutividade térmica comparado a outros metais como o alumínio, resultando assim em ciclos de injeção mais longos devido a necessidade de ter um maior tempo para resfriar a peça antes da sua extração. Apesar de tais vantagens do alumínio, não há muitas referências disponíveis do uso de moldes de alumínio no processo de moldagem por injeção. É de extrema importância portanto, avaliar a influência das propriedades térmicas do alumínio nos processos de trocas térmicas entre o molde e a peça moldada durante o ciclo de injeção, de forma a orientar o projeto criterioso dos moldes de alumínio, particularmente o seu sistema de resfriamento. Tais informações são essenciais para avaliar a viabilidade do uso de moldes de alumínio na fabricação de grandes lotes de peças plásticas injetadas. Diante da relevância do tema abordado, vale destacar também a importância da determinação dos parâmetros ótimos relacionados a cada etapa do ciclo de injeção. Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo verificar as diferenças encontradas entre os parâmetros de injeção para o molde de aço e alumínio, através de simulações do processo de moldagem por injeção usando métodos numéricos computacionais. Para determinar os parâmetros ótimos relacionados a cada etapa do ciclo de injeção foram utilizados Design of Experiments Taguchi e o software Moldflow para desenvolver as simulações reológicas. Os resultados revelaram que a diferença entre os materiais base dos moldes alteram significativamente os resultados, principalmente no que se refere a eficiência do sistema de resfriamento. Tais resultados são fundamentais para orientar o projeto do molde e a definição dos parâmetros ótimos de injeção em moldes de alumínio.

Palavras-chave: Moldes de alumínio, sistema de resfriamento, parâmetros de injeção

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente os aços são utilizados como matéria prima para a fabricação de moldes de injeção. Tal busca é justificada devido à alta resistência mecânica, boa estabilidade térmica e a possibilidade de realizar um acabamento superficial que os moldes necessitam. Embora o aço apresente estas vantagens, em contrapartida apresenta uma baixa condutividade térmica quando comparado a outros metais, como o alumínio por exemplo, resultando assim em ciclos de injeção mais longos devido à necessidade de ter um maior tempo para resfriar a peça antes da sua extração.

Visto que a produtividade na área de moldagem por injeção é afetada pelo tempo de ciclo de injeção, uma das opções encontradas para superar este aparente problema é a fabricação de moldes com materiais com propriedades térmicas mais vantajosas. Neste contexto, Arieta Filho (2006) salienta que uma alternativa para superar tal dificuldade é o uso de moldes fabricados com ligas de alumínio, pois apresentam uma condutividade térmica cerca de quatro vezes superior à do aço. Além disso, Menges e Mohren, (1983) afirmam que a utilização de ligas de alumínio para a fabricação de moldes de injeção permite não só uma boa distribuição de calor, como uma melhor dissipação, resultando assim em tempos de ciclos

menores proporcionando por sua vez, altas produtividades e peças com uma melhor qualidade. Shoemaker (2006) afirma que é recomendado que a temperatura do molde em um processo de injeção não esteja superior ou inferior a 10°C da temperatura definida na fase de preenchimento. De acordo como este autor esta condição permite desconsiderar os efeitos do gradiente de temperatura na qualidade da peça injetada.

Tendo em vista que o peso específico influencia diretamente no peso do material, esta característica tem que ser levada em consideração ao se realizar o projeto do molde. Como o peso específico do alumínio é menor que o do aço, o molde fabricado com este material apresentará menor peso. Sob este aspecto, o autor supracitado, salienta que infelizmente esta "característica positiva" não é totalmente reconhecida, já que, as placas individuais, que são componentes de um molde, são cerca de 40% mais espessas do que as placas de aço pelo fato de apresentar uma menor resistência mecânica (o módulo de elasticidade é apenas cerca de 30% do aço).

Além das propriedades específicas mencionadas como a condutividade térmica e o peso específico relacionadas aos materiais dos moldes, é necessário também ter controle ideal dos parâmetros de injeção para que tanto a produtividade, assim como, os critérios de qualidade das peças injetadas sejam alcançados. O procedimento para determinar os parâmetros ótimo de injeção são relativamente complexos, mesmo fazendo uso de programas que simulam o processo de injeção. Para o caso de uso de moldes de alumínio, onde não há um conhecimento consolidado, tal tarefa é ainda mais difícil uma vez que não são conhecidos os efeitos das propriedades térmicas deste material nas condições de injeção da peça. Uma forma de realizar a avaliação dos parâmetros de injeção maneira mais criteriosa é através de *Design of Experiments* (DOE). O DOE traduzido para o português como "Planejamento de Experimentos" é uma ferramenta estatística de controle de qualidade muito utilizada para determinar a melhor configuração que um conjunto de variáveis controláveis de entrada devem apresentar para se maximizar um resultado de interesse. Montgomery (1991) destaca que essas técnicas são utilizadas para melhorar as características de qualidade dos produtos e processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar a utilização de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos, etc.). Além disso, o autor supracitado ressalta que problemas podem ser contornados quando planejados e analisados devidamente mediante a métodos e técnicas estatísticas. Galdamez e Carpinetti (2004) ainda destacam a necessidade de estudar simultaneamente o efeito dos parâmetros com diferentes níveis de regulagens para assim evitar possíveis problemas.

Na área de moldagem por injeção, muitos estudos foram realizados com vários tipos de DOE. Um dos mais utilizados é o método Taguchi. As principais ferramentas utilizadas através desta técnica são as matrizes ortogonais e uma medida estatística denominada de quociente de sinal de ruído (S/N), na qual é possível não só encontrar os parâmetros de controle associado à função perda de qualidade que maximiza, minimiza ou centraliza o resultado num valor alvo, como também escolher um controle mais robusto nos parâmetros, que apresente melhores resultados.

Com o intuito de otimizar os parâmetros de processo, muitos pesquisadores utilizam esse método para minimizar também os possíveis defeitos inerentes do processo de injeção. Hussin, Saad e Dawi (2012), por exemplo, utilizaram o método Taguchi para analisar e otimizar os parâmetros de processo, como temperatura do molde, temperatura do amolecido, tempo de compactação, pressão de compactação, tempo de resfriamento, temperatura de resfriamento e tamanho dos canais de distribuição com o objetivo de minimizar o defeito de empenamento. Os resultados mostraram que a temperatura do amolecido contribui com 54,22%, o tamanho dos canais de distribuição com 14,62%, a temperatura ambiente com 11,17%, a temperatura do molde com 8,54%, a pressão de compactação com 4,61%, o tempo de compactação com 4,53%, a temperatura de resfriamento com 1,85% e tempo de resfriamento com 0,85% como fator de influência para o defeito de empenamento. Utilizando os parâmetros ótimos encontrados no planejamento Taguchi os autores reduziram o defeito do empenamento em 12%.

Atrelado a um DOE, outra ferramenta estatística comumente que auxilia na interpretação dos resultados é a Análise de Variância conhecida como ANOVA. Por meio desta técnica é possível verificar, por exemplo, quais parâmetros exercem mais influência em uma determinada variável de resposta. Neste contexto, Kun (2019) utilizou a metodologia Taguchi no qual os parâmetros de projeto escolhidos para realizar as simulações foram teor e proporção de fibra do polímero, temperatura do amolecido, pressão de injeção e tempo de resfriamento. Como objetivos de qualidade, o autor analisou o empenamento, a contração volumétrica e a tensão residual. Por meio da ANOVA o resultado mostrou que os parâmetros da fibra são os fatores influentes mais significativos para o empenamento e tensão residual.

Diante o que foi exposto o presente artigo tem como objetivo verificar os efeitos das propriedades térmicas do material do molde nos parâmetros de injeção, projeto de molde e qualidade da peça, avaliando assim as diferenças encontradas nos resultados das simulações reológicas relacionadas ao molde de aço e alumínio. Desta forma, este artigo está dividido em três seções de modo que, na primeira seção, são apresentados os materiais e os métodos utilizados para a determinação dos parâmetros ótimos de injeção, bem como na determinação dos melhores resultados relacionados aos critérios de qualidade da peça. Na segunda seção são apresentados os resultados encontrados relacionados a cada etapa do ciclo de injeção para o molde de aço e alumínio e na terceira seção é realizada uma breve discussão acerca dos resultados obtidos.

2. SIMULAÇÕES REOLÓGICAS

De acordo com Autodesk® Moldflow® Insight (2012), as simulações reológicas no Moldflow™ podem ser realizadas baseadas em dois métodos, Cool BEM (Boundary Element Method) e Cool FEM (Finite Element Method) que são simulações que consideram os efeitos ocorridos nas etapas de resfriamento. O Cool BEM é um método mais simples e menos conservativo onde não são considerados os efeitos de troca de calor do moldado com o molde. Neste caso, a

temperatura atribuída ao molde é considerada como uma condição de contorno na cavidade, não variando ao longo da análise. Esta condição despreza os efeitos das propriedades do molde e, portanto, os resultados obtidos para os moldes de aço e alumínio usando esta abordagem são iguais. A Fig. 1 apresenta um gráfico comparativo no qual mostra a variação da temperatura do molde em relação ao tempo para análise Cool FEM (transiente) e Cool BEM que utiliza a média da temperatura do molde durante o ciclo de injeção.



Figura 1. Variação da temperatura do Molde para a análise Cool FEM e Cool BEM (Ostergren, 2013).

O custo computacional da simulação Cool BEM usando o MoldFlowTM é inferior quando comparado com Cool FEM. Assim, o procedimento adotado neste trabalho foi desenvolver simulações Cool BEMs para o preenchimento e compactação, o projeto do sistema de resfriamento e posterior simulação completa Cool FEM para avaliar os efeitos das propriedades dos materiais nos resultados.

Além da consideração dos efeitos das propriedades dos materiais dos moldes, outra vantagem de utilizar a abordagem Cool FEM no MoldflowTM é que, através dessa análise, é possível obter resultados em sucessivos ciclos de injeção, uma vez que o programa fornece resultados denominados “desde o arranque”, ou seja, desde o momento em que a produção é iniciada. Neste caso as variações de temperatura do molde são simuladas desde o primeiro ciclo inicial quando o molde está frio, até o momento em que a temperatura do molde se estabilize, atingindo o regime estacionário, que, por sua vez, deve estar em condições ideais de operação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada é baseada no uso de métodos estatísticos e simulações do processo de moldagem por injeção para a determinação dos parâmetros ótimos para cada etapa do processo: preenchimento, compactação e resfriamento. As simulações reológicas foram realizadas através do MOLDFLOW SYNERGY 2019, enquanto os testes estatísticos foram realizados por meio do software estatístico MinitabTM.

3.1. Materiais dos moldes e polímero utilizado nas simulações reológicas

Os materiais utilizados para as simulações reológicas foram o aço P20, a liga de alumínio A1 e o polímero escolhido para realizar as análises foi o Polipropileno (PP) de nome comercial J-3021GR cujo fabricante é o Primer Polymer Co Ltd. Foram retirados da biblioteca do MoldflowTM. A faixa de operação utilizada para a temperatura do amolecido é de 60 a 260°C, 20 a 60°C para a temperatura do molde, tensão de corte máxima 0,25MPa e taxa de corte máxima 100000 s⁻¹. A peça escolhida para realizar o estudo foi um *cupholder* (porta-copo) simplificado, ou seja, um suporte para copos que fica localizado no painel central de um automóvel. Na Fig. 2 consta o modelo utilizado no presente trabalho.

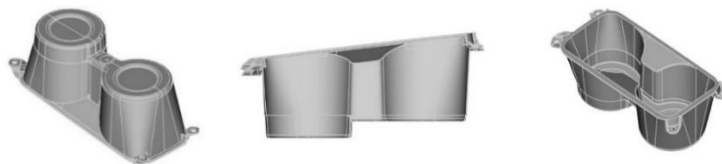


Figura 2. Vistas do *Cupholder* (Os autores, 2022).

3.2. Determinação dos parâmetros ótimos para cada etapa do ciclo de injeção

Para que uma peça atinja os critérios de qualidade estabelecidos no projeto é preciso ter o controle ideal dos parâmetros associados a cada etapa do ciclo de injeção. Dessa forma, para minimizar o surgimento de possíveis defeitos foram utilizados planejamentos Taguchi, onde foi atribuída a Função Perda de Qualidade Menor é Melhor, conforme descrita através da Eq. (1), para assim determinar a configuração dos parâmetros relacionados às etapas de enchimento e compactação na qual seriam realizadas as simulações reológicas.

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n_i} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

onde n_i = de repetições num ensaio (número de repetições independentes dos níveis de ruído) e y_i é a característica da qualidade (resposta observada), como por exemplo a diferença do valor da contração volumétrica da peça injetada obtida na análise corrente em relação aos valores recomendados.

Na simulação do preenchimento da peça o objetivo foi determinar o menor tempo de injeção levando em consideração a temperatura do molde e do amolecido, bem como os critérios que determinam um fluxo balanceado: perda de pressão (avaliando assim um eventual preenchimento incompleto), temperatura de frente de fluxo (para avaliar uma possível formação de linhas de solda), as tensões e taxas de cisalhamento, além do efeito de hesitação. Para a determinação do menor tempo de injeção, foram realizadas duas abordagens de modo a verificar qual delas apresentaria um melhor resultados dentro das condições analisadas: levantamento da curva “U” (pressão de injeção versus tempo de injeção) e um planeamento experimental Taguchi cuja matriz ortogonal composta de 9 experimentos do tipo L9 (3^2). Os parâmetros avaliados foram a temperatura do molde, avaliados em um intervalo de 45 a 75(°C), temperatura do amolecido abrangendo um intervalo de 190 a 210(°C) e a variável de resposta o tempo de enchimento (s). Para verificar qual parâmetro exerce maior influência no tempo de preenchimento, gerou-se uma equação de regressão, para a partir desta, realizar a ANOVA em um intervalo de confiança de 95%.

Os valores da temperatura do molde, temperatura do amolecido e tempo de injeção obtidos da etapa de enchimento foram utilizados para realizar as análises reológicas de compactação com base em um planeamento Taguchi composto de 16 experimentos do tipo L16 (4^2) em que as variáveis de entrada foram tempo de compactação, abrangendo um intervalo de 4 a 10s, pressão de compactação, variando de 30 a 60MPa, e a variável de resposta a contração volumétrica.

Em seguida, os parâmetros ótimos encontrados na etapa de compactação foram utilizados para realizar as análises de resfriamento para o molde de aço e alumínio, para definir as melhores condições de resfriamento do molde (leiaute e parâmetros do sistema de resfriamento). Para a realização dessas análises utilizou-se água como fluido de resfriamento à uma pressão de 1 bar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados de preenchimento e compactação

Na Tab. 1 encontram-se os resultados de tempo de preenchimento da cavidade no molde de aço e alumínio com base nas configurações obtidas do planeamento Taguchi.

Tabela 1. Tempo de enchimento no molde de aço e alumínio (Os autores, 2022).

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura do amolecido (°C)	190	190	190	200	200	200	210	210	210
Temperatura do molde (°C)	45	60	75	45	60	75	45	60	75
Tempo de preenchimento (s)	2,23	2,43	2,75	2,01	2,22	2,42	1,8	1,89	2,1
Velocidade de injeção (cm ³ /s)	54,48	49,8	44,08	60,27	54,57	49,84	67,4	63,67	57,33
Pressão de injeção (MPa)	26,93	24,86	23,74	23,9	22,77	21,62	22,4	20,9	20,26

Na Fig. 3 encontram-se os gráficos de resposta da relação S/N, onde no eixo vertical constam os valores obtidos através da Eq. 1, obtido do planeamento experimental Taguchi relacionado ao tempo de preenchimento para os moldes de aço e alumínio em função da temperatura do amolecido (°C) e temperatura do molde (°C).

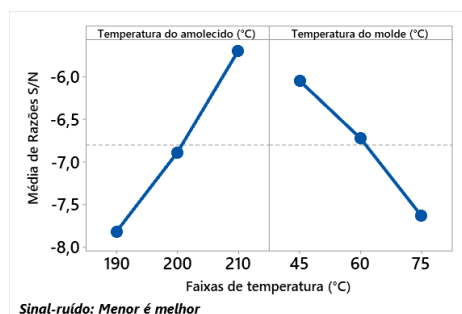


Figura 3. Gráfico de efeitos principais para Razões S/N para o tempo de enchimento (Os autores, 2022).

Como pode ser visto na Figura 3 ambos os parâmetros estudados, a temperatura do amolecido (°C) e a temperatura do molde (°C), apresentam inclinações semelhantes. Este resultado revela que quociente de sinal ruído (S/N) não foi adequado para identificar o fator que mais exerce influência no resultado para o tempo de preenchimento da cavidade, ou seja, o fator que mais contribui para que este tempo fosse minimizado. Assim, foi realizado a ANOVA com esses dois fatores para ter uma resposta mais apurada para a suas respectivas influências. Dessa forma, com os dados da tabela 1 foram realizadas regressões de modo a obter o modelo matemático que melhor representasse o tempo de preenchimento.

O modelo que descreve o tempo de preenchimento para o molde de aço e alumínio está descrito por meio da Eq. (2), assim como, os dados referentes ao modelo constam na tabela 2

$$T_p = 6,786 - 0,02700 \cdot T_a + 0,01367 \cdot T_m \quad (2)$$

onde T_p , T_a e T_m representam, tempo de preenchimento (s), temperatura do amolecido (°C) e temperatura do molde (°C), respectivamente.

Tabela 2. Sumário do modelo de regressão (Os autores, 2022).

Materiais dos moldes	S	R ²	R ² (ajustado)	PRESQ	R ² (predito)	AICc	BIC
Aço e alumínio	0,0539633	97,53%	96,71%	0,0504715	92,86%	-12,66	-21,87

Por meio dos resultados encontrados do modelo de regressão e da Análise de Variância para o modelo de preenchimento relacionado ao molde de aço e alumínio, conforme pode ser visto na Tabela 3, é possível observar que o fator que exerce mais influência neste processo é a temperatura do amolecido (°C).

Tabela 3. Dados da Análise de Variância (ANOVA) (Os autores, 2022).

Dados da ANOVA	Fonte	Graus de Liberdade	SQ Seq	Contribuição	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Tempo de preenchimento	Regressão	2	0,68955	97,53%	0,344775	118,40	0,00002
	T_a	1	0,43740	61,87%	0,437400	150,20	0,00002
	T_m	1	0,25215	35,66%	0,252150	86,59	0,00009
	Erro	6	0,01747	2,47%	0,002912	*	*
	Total	8	0,70702	100,00%	*	*	*

Visto que não houve discrepâncias nos resultados obtidos por meio das simulações de preenchimento para o molde de aço e alumínio construiu-se a curva U (Pressão de injeção versus Tempo de injeção) referente ao processo. Foi utilizada uma configuração de onze simulações, mantendo a temperatura do molde a 45°C e a temperatura do amolecido a 200°C (valores médios recomendados pelo banco de dados do MoldFlowTM), variando apenas o tempo de injeção. Os resultados encontrados para a pressão de injeção (MPa) podem ser verificados na Tabela 4.

Tabela 4. Pressão de Injeção versus Tempo de enchimento (Os autores, 2022).

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tempo de Injeção (s)	1,05	1,26	1,47	1,69	1,9	2,12	2,33	2,55	2,77	2,99	3,21
Pressão de Injeção (MPa)	31,25	30,44	29,29	28,72	28,72	28,19	27,62	27,53	28,34	28,5	28,66

De posse desses dados, gerou-se um gráfico de dispersão para, por meio de uma regressão polinomial, determinar a curva que melhor se ajusta aos dados. Em seguida, para melhorar a qualidade do ajuste dos dados à linha de tendência e determinar o tempo de preenchimento associado a pressão mínima de injeção, realizou-se um tratamento nos dados com base na retirada de pontos que apresentaram maiores desvios em relação aos valores simulados e previstos pelo modelo. Verificou-se então, após a retirada desses pontos, que o coeficiente de correlação aumentou, conforme pode ser observado na Fig. 4, chegando assim, em um tempo de preenchimento de 2,44s.

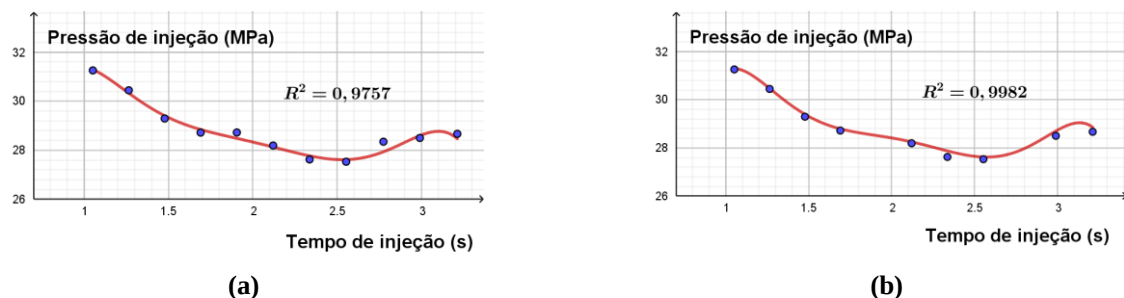


Figura 4. Curva Pressão de injeção versus Tempo de injeção: (a) antes da retirada de dados e (b) após a retirada de dados (Os autores, 2022).

Dessa forma, para a realização das análises de compactação foi adotado um tempo de preenchimento 2,44s obtidos da curva pressão de injeção versus tempo de injeção, assim como a temperatura do molde de 45°C e temperatura do amolecido de 200°C provenientes do planejamento Taguchi. Vale destacar que se buscou o menor tempo de injeção possível mantendo faixas adequadas de velocidade de injeção, de modo que não ultrapassa os limites máximos de operação.

Na etapa de compactação, utilizou-se um planeamento Taguchi baseado em 16 simulações a fim de compreender como o tempo e a pressão de compactação influenciam nos resultados relacionados às contrações volumétricas máximas. As simulações realizadas nesta etapa utilizaram os parâmetros ótimos encontrados na etapa anterior, referentes à temperatura do molde, temperatura do amolecido e tempo de preenchimento. A partir dos resultados encontrados das simulações construiu-se um gráfico de resposta da relação S/N, com o objetivo de medir a variação entre o tempo de compactação (s) e pressão de compactação (MPa) para assim encontrar as condições de ajuste dos fatores que venham a minimizar a contração volumétrica (%), conforme pode ser observado através da Fig. 5.

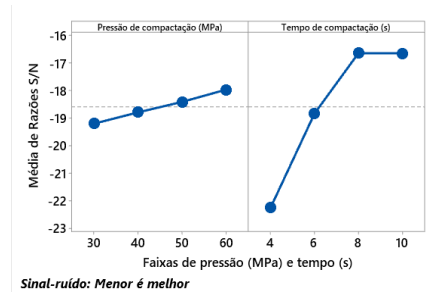


Figura 5. Gráfico de efeitos principais para Razões S/N para a contração volumétrica (%) (Os autores, 2022).

Através deste gráfico foi possível verificar que a pressão de compactação é o parâmetro que exerce menor influência no efeito da contração volumétrica tanto para o molde de aço como de alumínio. A Fig. 6 mostra a redução da contração volumétrica no tempo de compactação para a geometria estudada.

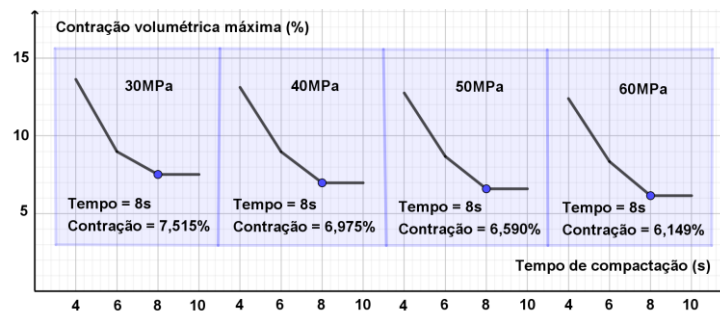


Figura 6. Contração volumétrica versus tempo de compactação para a geometria estudada (Os autores, 2022).

Os resultados ratificaram que a partir do momento em que o canal de injeção já está solidificado, o que ocorre em aproximadamente 8 segundos, a pressão de compactação não produz qualquer efeito adicional. Dessa forma, não há mais variação da contração volumétrica no tempo de compactação e com isso, atinge-se o tempo máximo relacionado a etapa de compactação. Dessa forma, conforme visto na Fig. 5, tem-se que 8s é o maior tempo de compactação que pode ser adotado para as condições obtidas na simulação de preenchimento.

4.2. Resultados relacionados ao projeto do sistema de resfriamento

Por se tratar de materiais distintos foram utilizados leiautes diferentes para os sistemas de resfriamento. Para o molde de aço foi proposto um sistema com 6 canais (4 superiores e 2 inferiores) enquanto para o molde de alumínio foram propostos 2 canais (1 superior e 1 inferior), todos com diâmetros de 11,5mm. Na Fig. 7 são apresentados os leiautes dos sistemas de resfriamento para ambos os moldes.

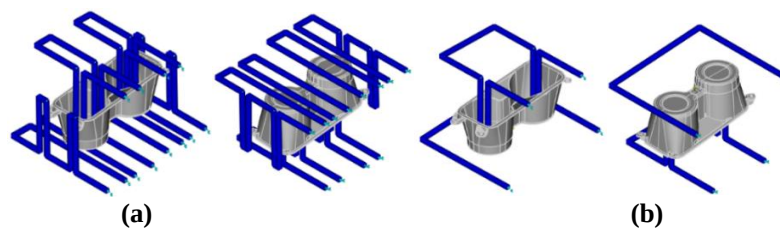


Figura 7. Leiaute do sistema de resfriamento: (a) molde de aço e (b) molde alumínio (Os autores, 2022).

Os resultados relacionados às análises de resfriamento para os sistemas propostos indicaram a utilização de 33°C como temperatura do fluido de resfriamento no molde de aço e 40°C para o molde de alumínio. No molde de aço este fluido teve um aquecimento de 1,4°C na saída do canal, enquanto no molde de alumínio o fluido aqueceu apenas 0,59°C.

No molde de aço foram identificados pontos de concentração de calor (*hot-spots*), que impedem que um novo ciclo de injeção seja iniciado. Diante disso, não foi possível diminuir a temperatura nessas regiões já que o projeto do sistema de resfriamento não podia ser alterado. A solução foi aumentar o tempo de resfriamento adicionando 22,86 segundos além do tempo necessário para a desmoldagem da peça. Após este período adicional, o molde de aço atingiu o perfil de temperatura adequada para um novo ciclo de injeção, conforme sugerido por Shoemaker (2006). Comparando com o molde de alumínio, este necessitou de 1,42s de tempo adicional de resfriamento para atingir a condição para o início do ciclo subsequente, tempo este similar àquele correspondente a abertura e fechamento do molde. Ademais, os *hot-spots* que apareceram no molde de aço, não foram formados no alumínio, necessitando assim de um tempo de resfriamento muito menor. Dessa forma, o tempo de ciclo total de ciclo para o molde de alumínio foi de 18s, enquanto para o aço, esse tempo foi de 38,75s. Na figura 8 mostra a região da peça destacada pelo retângulo, fazendo um comparativo em que foram formados pontos de concentração de calo no molde de aço enquanto no alumínio não.

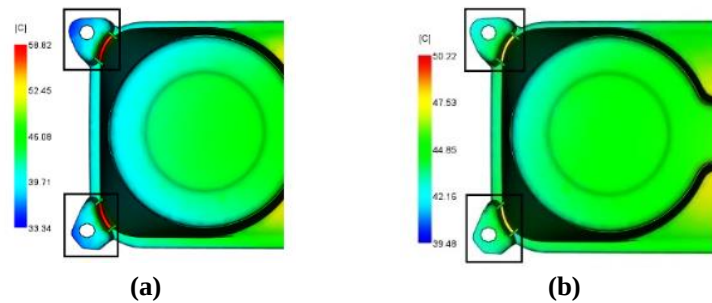


Figura 8. Região da peça onde foram formados pontos (Os autores, 2022).

Através dos resultados encontrados ficou claro como a condutividade térmica influencia tanto na formação de *hot-spots*, bem como no tempo de resfriamento. Neste contexto, o molde de alumínio apresentou vantagem significativa, uma vez que a alta condutividade térmica permitiu uma redução significativa no gradiente de temperatura ao longo da cavidade.

4.3. Comparação dos resultados para as simulações *Cool BEM* e *Cool FEM*

Além dos parâmetros de injeção, os resultados encontrados referentes aos parâmetros de qualidade (densidade, contração volumétrica, marcas de contração ou ar aprisionado e empenamento) são de grande importância para estabelecer não somente comparações entre os materiais utilizados nos moldes, bem como servem de indicativo para determinar se é importante ou não realizar simulações *Cool FEM*. Na Tab. 5 encontram-se os resultados referentes aos parâmetros de qualidade da peça para os moldes de aço e alumínio.

Tabela 5. Parâmetros de qualidade da peça relacionados ao molde de aço e alumínio (Os autores, 2022).

Material do molde	Parâmetros de qualidade da peça	Densidade da peça (g/cm ³)	Peso da peça (g)	Contração volumétrica máxima (%)	Contração volumétrica média (%)	Marcas de contração (mm)	Empenamento máximo (mm)
Aço	Simulação <i>Cool BEM</i>	0,9317	102,76	7,3	3	0,0265	0,7297
	Simulação <i>Cool FEM</i>	0,9304	102,74	7,54	3,06	0,0285	0,7397
	Diferença Percentual (%)	0,14	0,02	3,21	1,84	7,55	1,37
Alumínio	Simulação <i>Cool BEM</i>	0,9293	102,73	7,46	3,02	0,0255	0,6153
	Simulação <i>Cool FEM</i>	0,9287	102,74	7,37	3,04	0,0271	0,6088
	Diferença Percentual (%)	0,06	0,01	1,22	0,54	6,27	1,06

Conforme apresentado na Tab. 5, os melhores resultados para os parâmetros de qualidade analisados foram para o molde de alumínio. Além disso, é possível perceber também que não houve uma diferença significativa quando comparado os resultados das simulações *Cool FEM* e *Cool BEMs*. Os resultados revelaram também que os efeitos transientes foram mais significativos no molde de aço comparado ao molde de alumínio. Estes resultados são justificados mediante a pequena variação da temperatura da peça e do molde encontrados nas simulações reológicas conforme apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Parâmetros de injeção relacionados ao molde de aço (Os autores, 2022).

Parâmetros de injeção	Simulação <i>Cool BEM</i>	Simulação <i>Cool FEM</i>	Diferença Percentual (%)
Temperatura mínima do molde (°C) – Superfície da Cavidade	35,29	33,04	6,38
Temperatura média do molde (°C) – Superfície da cavidade	45,59	40,07	12,11
Temperatura máxima do molde (°C) – Superfície da cavidade	55,26	49,17	11,02
Temperatura mínima da peça (°C)	35,26	33,95	3,72
Temperatura média da peça (°C)	48,51	41,26	14,95
Temperatura máxima da peça (°C)	55,08	50,24	8,79
Tempo computacional necessário para realizar a análise	2h 7min 19s	4h 53min 5s	130,2

Tabela 7. Parâmetros de injeção relacionados ao molde de alumínio (Os autores, 2022).

Parâmetros de injeção	Simulação <i>Cool BEM</i>	Simulação <i>Cool FEM</i>	Diferença Percentual (%)
Temperatura mínima do molde (°C) – Superfície da Cavidade	39,48	40,26	1,98
Temperatura média do molde (°C) – Superfície da cavidade	45,06	43,58	3,28
Temperatura máxima do molde (°C) – Superfície da cavidade	50,22	46,54	7,33
Temperatura mínima da peça (°C)	39,45	42,56	7,88
Temperatura média da peça (°C)	51,43	46,50	9,59
Temperatura máxima da peça (°C)	50,06	51,74	3,36
Tempo computacional necessário para realizar a análise	2h10min17s	3h48min43s	75,55

Para que as peças injetadas tenham a qualidade desejadas é necessário garantir que se atinja as condições ótimas de operação, ou seja, que o molde esteja em regime estacionário e com os parâmetros de processo determinados nas simulações. Sob este aspecto vale destacar que o alumínio atingiu mais rápido esta condição. Enquanto no molde de aço foram necessários um total de 25 ciclos de injeção, o molde de alumínio atingiu esta condição após 11 ciclos. As Figuras 9 e 10 mostram a distribuição de temperatura após os moldes atingirem o regime estacionário.

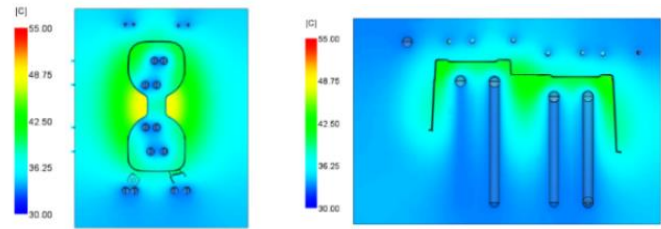


Figura 9. Distribuição de temperatura no molde de aço (Os autores, 2022).

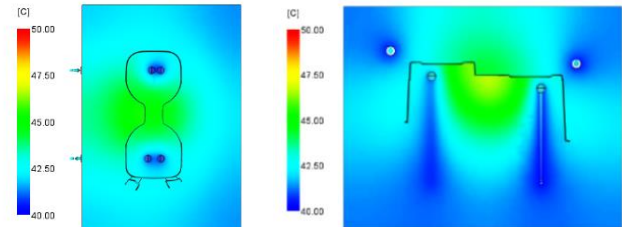


Figura 10. Distribuição de temperatura no molde de alumínio (Os autores, 2022).

Com base nos resultados apresentados, assim como no perfil da distribuição de temperatura do molde apresentados nas Figs. 9 e 10 é possível perceber que uma condutividade térmica maior promove uma melhor uniformidade da temperatura do molde e consequentemente na superfície da cavidade.

5. CONCLUSÃO

No presente artigo foram avaliados os efeitos das propriedades térmicas do material do molde nos parâmetros de injeção e na qualidade da peça injetada. Através de planejamentos experimentais Taguchi, métodos estatísticos e simulações reológicas Cool BEMs e Cool FEMs, através do Moldflow™, foi possível determinar os parâmetros ótimos relacionados ao ciclo de injeção em moldes de aço e alumínio para a geometria estudada. Dessa forma, obteve-se uma temperatura do amolecido de 200°C, temperatura do molde de 45°C, tempo de enchimento de 2,44s e pressão de compactação de 30 MPa. Os resultados também revelaram que foi necessário adotar o tempo de compactação máximo possível (8s) para minimizar a contração volumétrica conforme apresentado na Tab. 6. Levando em consideração o tempo de ciclo total e o número de ciclos necessários para que o molde atinja o regime estacionário foi determinado um tempo de 18 minutos e 13 segundos e 4 minutos e 13 segundos, respectivamente, para os moldes de aço e alumínio atinjam esta condição.

Referentes à qualidade da peça, vale destacar que não houve estimativa de formação de linhas de solda mediante aos parâmetros ótimos encontrados para ambos os moldes avaliados. Com relação às marcas de contração, contração volumétrica e empenamento máximo, tem-se que os maiores resultados foram obtidos para as simulações reológicas utilizando o método FEM para o molde de aço. Em comparação aos resultados encontrados para o molde de alumínio, as marcas de contração foram 4,91% superiores, a contração volumétrica máxima foi 2,25% superior. No que diz respeito ao empenamento máximo da peça, tem-se um valor de 0,7397mm no molde de aço e 0,6153mm no molde de alumínio, uma diferença, portanto, de 16,81%.

Conforme mencionado anteriormente, a presença dos *hot-spots* no molde de aço foi um fator decisivo para o aumento do tempo de resfriamento da peça, sendo necessário adicionar 22,86 segundos além do tempo necessário para a desmoldagem da peça. Já no molde de alumínio, não teve regiões com picos de temperatura, sendo possível assim, ter um tempo de resfriamento inferior ao molde de aço. Ademais, é importante evidenciar que o processo de formação de *hot-spots* ocorre em peças com geometrias complexas, como o *cupholder* abordado no presente trabalho. A partir dos resultados encontrados, percebeu-se que a presença desses concentradores de calor corroborou na diferença significativa do tempo de ciclo entre os dois moldes encontrado.

Conforme observado nas Figuras 9 e 10, à medida que os moldes atingem o regime estacionário, foi possível perceber a diferença nos perfis da distribuição de temperatura. Pelo fato de o alumínio ter uma maior condutividade térmica, notou-se uma maior uniformidade na temperatura do molde de alumínio resultado em menores valores de empenamento e melhor qualidade da peça injetada no molde fabricado com este material. Ainda neste contexto, para atingir as condições ideais de temperatura média do molde com uma variação de $\pm 10^\circ\text{C}$ entre a máxima e a mínima, o processo da obtenção dos parâmetros ótimos de injeção foi mais fácil nas análises com o molde o alumínio.

Tendo em vista que, no processo de moldagem por injeção, moldes em alumínio são pouco utilizados e com o objetivo de ter respostas concretas acerca dos resultados encontrados, foram feitas outras simulações com um sistema de resfriamento com uma quantidade de canais maior para verificar se é possível reduzir o tempo de ciclo. Os resultados demonstraram que não é viável adicionar mais canais ao molde de alumínio. Pelo fato de ter mais fluido percorrendo os canais é necessário aumentar a temperatura do fluido de resfriamento para que a temperatura média do molde atinja o valor que foi definido na etapa de enchimento.

Considerando o tempo de 3s para abertura e 2s para o fechamento do molde, o tempo total de ciclo de injeção para o molde de aço foi de 43,75s e 23s no molde de alumínio, o que corresponde assim a uma redução de 47,43% no tempo total de ciclo. Esse resultado revela um aumento significativo na produtividade do processo e uma grande vantagem ao optar por utilizar o alumínio como matéria prima para a fabricação de moldes. Importante notar que o sistema de resfriamento para o molde de alumínio foi mais simples e, portanto, o tempo e custo de fabricação do molde serão menores. Mesmo com a utilização de uma menor quantidade de canais, os resultados referentes à produtividade e qualidade da peça foram melhores.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é um resultado parcial do Projeto DEMALAP - Demonstrador de Molde em Alumínio para Alta Produção patrocinado pelo Programa Rota 2030 do Governo Federal descrito na lei N°. 13.755/2018 e é coordenado pela FUNDEP. Os executores do projeto são as universidades SENAI CIMATEC, UFBA e UFSC. Nós agradecemos aos outros parceiros do projeto pelo suporte prestado: ESSS Engineering Simulation and Scientific Software Ltda.; Ford Motor Company Brasil Ltda., Moldit Brasil Ltda.; Open Mind Tecnologia Brasil Ltda.; Renault do Brasil S.A.; SMRC Fabricação e Comércio de Produtos Automotivos do Brasil Ltda. e Union Indústria de Moldes e Comércio Atacadista de Máquinas Eireli.

7. REFERÊNCIAS

Arieta, F. F. G.; “Ligas de Alumínio de Alta Resistência para Moldes de Injeção de Termoplásticos: ficção ou realidade?”. *Revista Ferramental*; Acesso em 29/07/2021 < https://issuu.com/revistaferramental8/docs/edi____o_8 >; Edição 8, fevereiro 2006.
Autodesk® Moldflow® Insight 2012. *AMI Cool Analysis Products*

- Galdamez, E.; V. Cardoza; Carpinetti, L. C. R. “Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica”. *Gestão & Produção*, v.11, n.1, p.121-134, jan.-abr. 2004
- Hussin, R.; Saad, R. M.; Hussin, R.; Dawi, M. S. I. M; “An Optimization of Plastic Injection Molding Parameters Using Taguchi Optimization Method”. *Asian Transactions on Engineering*, Vol. 02, Issue 05, pp. 75–80.
- Kun, Li.; Shilina, Yan.; Yuchenga, Zhong; Wenfengc, Pan; Gangb, Zhao; “Multi-objective optimization of the fiber-reinforced composite injection molding process using Taguchi method, RSM, and NSGA-II”. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2019. Vol. 91. P.69-82.
- Menges, G., & Mohren, P. (1983). *How To Make Injection Molding*. Hanser Publication, New York.
- Montgomery, D. C. “Diseño y análisis de experimentos”. Trad. Jaime Delgado Saldivar. México: Iberoamérica, 1991.
- Ostergren, A. “Prediction of residual stresses in injection moulded parts”. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2013.
- Shoemaker, J. *Mouldflow desing guide: a resource for plastic engineers*. Hanser Gardner Publications, 2006.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ALUMINUM INJECTION MOULDS: EFFECTS OF THE MOULD MATERIAL THERMAL PROPERTIES ON THE INJECTION MOULDING PARAMETERS AND THE MOULD DESIGN

João Pedro Andrade Pereira

Sarah Gomes Araújo de Jesus

Evandro Menezes de Souza Amarante

Armando Sá Ribeiro Júnior

Universidade Federal da Bahia, R. Prof. Aristides Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, 40210-630, Brasil
joaopap@ufba.br; sarah.araujo@ufba.br; evandro.amarante@ufba.br; asrj@ufba.br

Cristiano Vasconcellos Ferreira

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88010-970, Brasil
cristiano.v.ferreira@ufsc.br

Valter Estevão Beal

SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador - BA, 41650-010, Brasil
valtereb@fieb.org.br

Abstract. *In thermoplastics injection moulding, the polymer is inserted into an injection machine in which it is softened, injected inside the mould cavity, compacted and cooled, until it reaches the required solidity to its extraction. In this context, it is worth noticing that the injection parameters and the moulded part characteristics (e.g., contraction marks, welding lines, warpage) are important features that must be inspected, in order to ensure that the productivity and quality requirements are achieved. The moulds are commonly made of steel, due to its high mechanical strength, good thermal stability and the possibility to easily obtain the desired surface finish. Despite these advantages, steel has a low thermal conductivity when compared to other metals, such as aluminum, resulting in more time required for the part to cool down before extraction and consequently, longer injection moulding cycles. However, there is a lack of information regarding the usage of aluminum for thermoplastic's injection moulds. Therefore, there is a demand to evaluate the thermal properties of the aluminum on the heat exchange between the mould and the moulded part during the injection cycle, in order to improve the project of aluminum moulds, especially their cooling system. Such information is crucial to assess the viability of aluminum moulds usage in the manufacturing process of large batches of plastic moulded parts. It is also of interest to determine the optimal parameters related to each injection cycle stage. This paper aims to verify the differences found between the cooling system and the moulding parameters applied to steel and aluminum moulds, by performing numerical simulations of the moulding process. To determine the optimal parameters related to each stage of the injection moulding process, the Design of Experiments Taguchi and the software Moldflow were used to plan and develop the rheological simulations. The results reveal that the difference between the mould's materials properties changes significantly the injection moulding conditions and the mould design, particularly the cooling system efficiency. These results are essential to guide the mould project and to define the optimal injection parameters in aluminum moulds.*

Keywords: *aluminum moulds; cooling system; mould injection parameters*