

## ANÁLISE TÉRMICA DE INSERTOS POLIMÉRICOS EM MOLDES HÍBRIDOS ATRAVÉS DE INSTRUMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO

Maikol Funk Drechsler, maikol.f.drechsler@grad.ufsc.br<sup>1</sup>  
Carlos Mauricio Sacchelli, carlos.sacchelli@ufsc.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Rua Dr. João Colin, 2700, Santo Antônio. Joinville – SC – Brasil

**Resumo:** O menor tempo e em alguns casos menor custo de fabricação vem motivando o uso de ferramentais rápidos obtidos com materiais alternativos (resinas poliméricas) para manufatura de alguns componentes do molde de injeção. Porém, este tipo de tecnologia encontra barreiras nas propriedades térmicas destes materiais, que dificultam a troca de calor do componente injetado com o ambiente. Desta maneira, o objetivo deste trabalho consiste em analisar como as diferentes propriedades térmicas do inserto polimérico obtido pelo processo FDM (Fusion and Deposition Modeling) de manufatura aditiva, podem interferir no desempenho do processo durante os ciclos de injeção. Para isto, um molde de injeção foi instrumentado objetivando o monitoramento da temperatura durante o ciclo de fabricação. Os dados do processo foram comparados com os resultados obtidos na simulação computacional. Os resultados obtidos da simulação foram bem semelhantes aos encontrados no processo. Como conclusão, tem-se que devido à baixa difusividade térmica do inserto, componentes injetados de grande espessura devem ser evitados e que para esse tipo de molde é provável a ocorrência de uma região de acúmulo de calor, necessitando prever sistemas de refrigeração.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva, Fusion and Deposition Modeling, Molde de Injeção.

### 1. INTRODUÇÃO

Rosato (1995) explica que um molde híbrido consiste de um molde com inserto confeccionado em metais leves, resinas epóxi ou borrachas de silicone. Com o atual avanço das manufaturas aditivas, os polímeros passaram a ser também empregados na fabricação dos insertos.

Segundo Rajaguru, Duke e Au (2015) há um aumento no interesse do uso de manufatura aditiva para construção de ferramental rápido. O autor relata que este fato é motivado pelo menor custo e tempo de fabricação deste tipo de ferramental.

Hurst (2014) aponta que o uso de moldes híbridos obtidos pela nova tecnologia Polyjet, podem reduzir em mais de 85% os investimentos e gastos de tempo, evitando ainda problemas de reengenharia e reduzindo custos de projeto. O material utilizado pelo autor trata-se do ABS-Digital indicado pela fornecedora para construção de ferramentais rápidos. Porém segundo Pradella e Folle (2014) esta tecnologia possui um maior custo agregado.

A tecnologia de manufatura aditiva por FDM (Fusion and Deposition Modeling) como apresentado por Pradella e Folle (2014) é a mais acessível dentre as tecnologias presentes atualmente no mercado. Para Franchetti e Kress (2016), desde 2010 o ingresso de novas marcas e a transformação do mercado gerou uma maior facilidade ao acesso deste tipo de tecnologia. Segundo o autor, esta transição ocorreu devido à diminuição do custo de processadores e expiração de algumas patentes na área.

Fernandes (2013) aponta ainda que a construção de moldes através de materiais alternativos como polímeros e resinas contribui para a modificação da cristalinidade do material injetado. Em seu estudo o autor conclui que isto ocorre devido a menor condutividade térmica da resina, tirando calor do injetado em taxas menores que as convencionais.

Lin et al (2013) realizaram estudos que comprovaram que a mudança da cristalinidade do material injetado influencia significativamente nas características mecânicas do material como ductilidade e resistência a tração.

Como apresentado por Jiang et al (2015) a temperatura do molde é um importante parâmetro para determinar as características finais do componente injetado. Porém Atre et al (2014) destacam que no processo de injeção de termoplásticos, os parâmetros conhecidos estão vinculados a máquina de injeção e ao circuito de refrigeração. Com a finalidade de contornar estas dificuldades, a aquisição de dados diretamente do molde e a simulação do processo apresentam-se como adequadas possibilidades.

Desta forma, Lidomar et al (2013) propuseram um sistema que permitisse prever possíveis erros no processo de injeção através da aquisição de dados de temperatura no molde. Com estes valores a distribuição de temperatura no molde pode ser estabelecida e a temperatura no produto estimada.

Martinho, Bártolo e Pouzada (2009) compararam através de simulação as deformações apresentadas em insertos híbridos e em insertos de metal. Os resultados mostraram que os insertos de resina e polímero são mais suscetíveis a deformação devido ao baixo ponto de fusão e menor resistência mecânica. Desta forma no estudo de moldes híbridos a avaliação da temperatura e pressão no molde, torna-se ainda mais importantes.

Como apresentado por Dang (2014), o uso de simulações em softwares CAE (Computer Aided Engineering) permite estabelecer parâmetros de injeção que reduzam o tempo de ciclo e aumentem a qualidade dos injetados. A simulação em

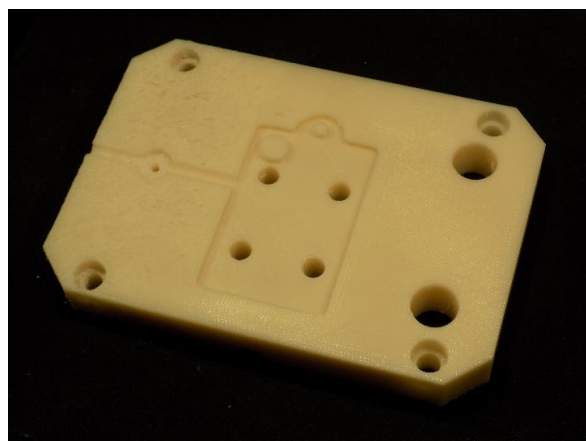
softwares CAE pode ser usada ainda para definir a melhor arquitetura do molde como em Marques et al (2015). Em seu estudo o autor estabelece a melhor forma de refrigeração para o produto em estudo, permitindo assim reduzir custos de try-out e maximizar o tempo de produção.

O propósito deste trabalho encontra-se em definir como as diferentes propriedades térmicas do inserto polimérico podem interferir no seu desempenho durante os ciclos de injeção. O estudo visa ainda comparar os resultados obtidos através da simulação por método computacional com os dados obtidos pela instrumentação do molde, validando assim a análise computacional. Através da simulação busca-se com este estudo ainda verificar como a temperatura é distribuída no inserto, verificando os fatores que influenciam nesta disposição.

## 2. METODOLOGIA

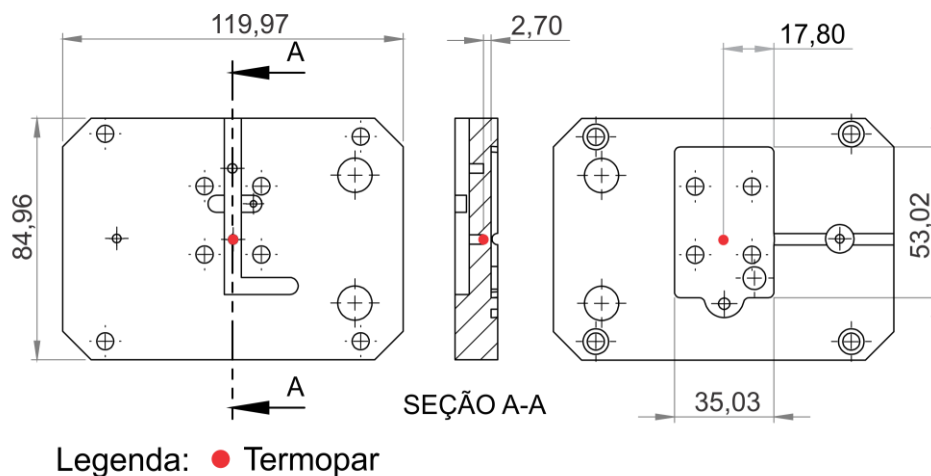
O produto utilizado neste trabalho é um chaveiro em forma de placa, com 2,3 mm de espessura, que apresenta furos e rebaixos que permitem avaliar as mudanças de geometria no processo de injeção de moldes híbridos. As dimensões do chaveiro são de 53 mm de comprimento e 35 mm de largura.

O ferramental rápido foi construído pelo processo de *FDM*, utilizando o polímero *ABSPPlus - P430*, na máquina *Dimension Elite*. Para os parâmetros de impressão foi escolhida a opção sólida com camada do filete de 0,178 milímetros por garantir maior precisão e resistência na construção dos corpos. A Fig. (1) apresenta o ferramental manufaturado.



**Figura 1. Inserto obtido por manufatura aditiva.**

Somente o lado móvel do molde recebeu o ferramental rápido, enquanto o lado fixo permaneceu com o inserto em Aço P20. A parte móvel recebeu um sensor termopar tipo E, acoplado a um orifício envolto por pasta térmica na mesma linha do canal de injeção, 18 mm para dentro da peça com uma distância de 2,7mm de ABS entre o sensor e a peça injetada. Na Fig. (2) é possível verificar o ponto em que foi instalado o sensor.



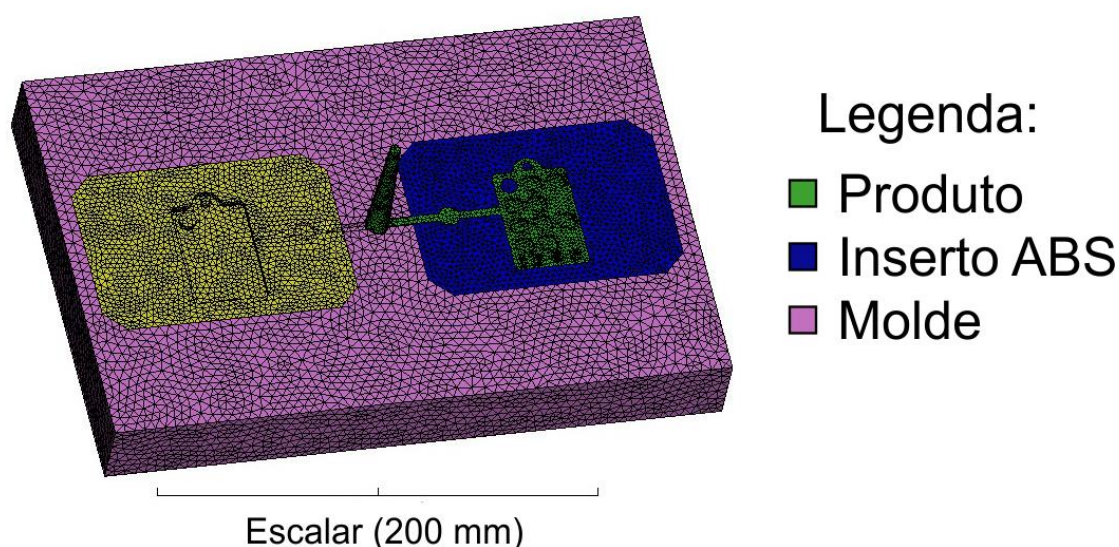
**Figura 2. Localização de instalação do termopar.**

Como já apresentado por Lidomar et al (2013) os termopares possuem uma limitação em seu tempo de resposta, desta forma a frequência de captação foi definida em 1 dado por segundo, visando evitar o uso desnecessário de armazenamento e processamento.

O Termopar foi conectado ao dispositivo da National Instruments NI 9211, com 9 canais analógicos de entrada de 24 bits, para interligar o dispositivo ao computador foi utilizado o Hi-Speed USB Carrier NI USB-9162, sendo os dados foram processados com auxílio de uma rotina implantada no software LABVIEW.

Para a definição dos parâmetros de injeção foram realizadas simulações no *software Moldflow®*. O algoritmo usado na simulação foi de Arrefecimento em elementos finitos (FEM), enchimento, compactação e empenamento. Avaliações feitas com o Arrefecimento (FEM) permite a geração de malha tridimensional no molde e a consequente avaliação de temperatura no inserto.

Na simulação, o produto possui 86.526 elementos enquanto no conjunto de molde e insertos 861.365 elementos. Apesar de usar elementos de maior tamanho, o maior volume do molde acarretou em um número maior de elementos. Para a simulação a razão de aspecto indicada pelo *software* foi respeitada para todos os componentes. A Fig. (3) apresenta a parte inferior do conjunto peça, inserto e molde.



**Figura 3. Malha gerada para simulação.**

Os parâmetros do material do inserto de ABS foram inseridos na biblioteca do *software* com base nos valores disponibilizados pelo fornecedor e a densidade foi calculada com base no volume e na massa do inserto impresso. Para os componentes de P20 foram empregados os dados disponíveis na biblioteca do *Moldflow*. A Tab. (1) apresenta os dados usados.

**Tabela 1. Propriedades físicas e térmicas dos insertos.**

| Propriedades                    | ABS      | Aço P20  | Unidades          |
|---------------------------------|----------|----------|-------------------|
| Densidade                       | 0,99     | 7,80     | g/cm <sup>3</sup> |
| Calor específico                | 2400     | 460      | J/Kg.°C           |
| Condutividade térmica           | 0,18     | 29,00    | W/m.°C            |
| Módulo de elasticidade          | 2200     | 205000   | MPa               |
| Razão de Poisson                | 0,392    | 0,290    | --                |
| Coeficiente de expansão térmica | 8,82E-05 | 1,20E-05 | 1/°C              |
| Difusividade térmica            | 7,50E-08 | 6,30E-05 | m <sup>2</sup> /s |

A temperatura de injeção foi definida como 190°C, objetivando uma menor quantidade de calor no inserto híbrido. A partir deste ponto o tempo de ciclo foi variado até obter uma temperatura máxima abaixo da transição vítrea do ferramental rápido. A temperatura de transição foi retirada da folha de especificações do fabricante como sendo 108°C.

Para permitir uma melhor análise a simulação foi também realizada para um inserto de Aço P20, permitindo assim prever algumas diferenças entre os tipos de insertos.

Um inserto extra foi usado a fim de conferir os parâmetros de injeção diretamente na injetora ROMI EL75. Para completar a injeção, a pressão de injeção empregada no processo real foi levemente maior que a pressão simulada. A Tab. (2) apresenta os parâmetros de injeção simulados e reais.

**Tabela 2. Parâmetros de injeção utilizados.**

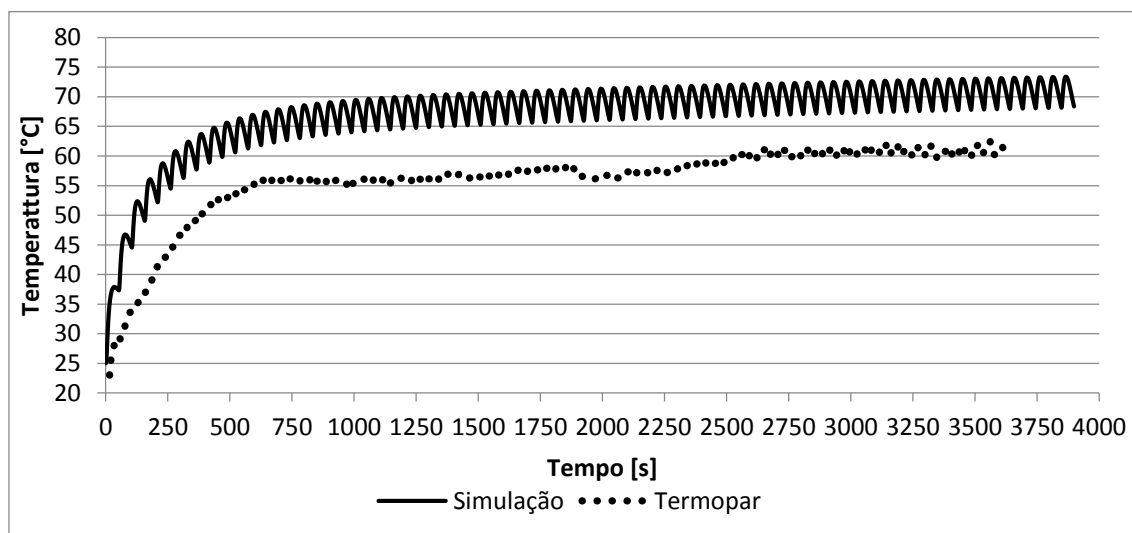
|                                   | Real    | Simulado |
|-----------------------------------|---------|----------|
| Pressão de injeção estimada [Bar] | 1000,00 | 554,78   |
| Pressão de comutação [Bar]        | 800,00  | 443,82   |
| Tempo de recalque [s]             | 2       | 2        |
| Tempo de injeção [s]              | 1,2     | 1,2      |
| Tempo médio de ciclo [s]          | 48,37   | 52,00    |
| Temperatura de processo [°C]      | 190     | 190      |
| Tempo de molde aberto [s]         | -       | 5        |
| Tempo de refrigeração [s]         | 25,00   | 25,00    |

Após definidos os parâmetros um novo inserto de ABS foi instalado e um total de 75 peças foram injetadas com PP H603 da fornecedora Braskem. O número de ciclos foi definido através de inspeção visual da degradação do inserto e dos produtos.

O tempo médio do ciclo se apresentou menor que o esperado visto que o tempo de retirada da peça do molde foi configurado como 5 segundos de molde aberto na simulação, porém no processo real este tempo foi reduzido.

### 3. RESULTADOS

As simulações em regime transiente foram comparadas com os dados captados pelo termopar. A Fig. (4) apresenta os valores obtidos.



**Figura 4. Temperatura de injeção simulada e captada pelo termopar.**

Como já apresentado, devido ao baixo tempo de resposta do termopar, a simulação previu uma oscilação que não está presente nos dados obtidos na realidade. Ambas as avaliações não apresentaram uma convergência clara para uma temperatura final. Isto é explicado pela falta de refrigeração no molde, dificultando o alcance de um regime permanente de remoção do calor. Porém, após 75 ciclos, a simulação apresentou uma variação da temperatura de um ciclo para outro menor que 0,08 °C. Assim, pôde ser assumido como regime permanente do processo.

A temperatura simulada apresentou-se sempre maior que a real. Este fato é esperado pelo modelo computacional, onde o inserto não possui porosidades e não é levada em conta a resistência do acoplamento do sensor.

Contanto, o comportamento da temperatura simulada foi confirmado no processo real, a obtenção de parâmetros térmicos diretamente do inserto pode reduzir as aproximações realizadas e tornar a comparação com maior semelhança.

A simulação apresentou-se muito útil por permitir uma avaliação da distribuição de temperatura em todo o inserto e durante todo o processo de injeção. A Fig. (5) apresenta a distribuição de temperatura do molde em 4 pontos: No início e consequente final do ciclo (0,00s), em um ponto próximo ao final da injeção (0,95 s), no ponto em que a temperatura é maior (4,56s) e em 12,07s quando fica bem claro as regiões em que a temperatura é maior.

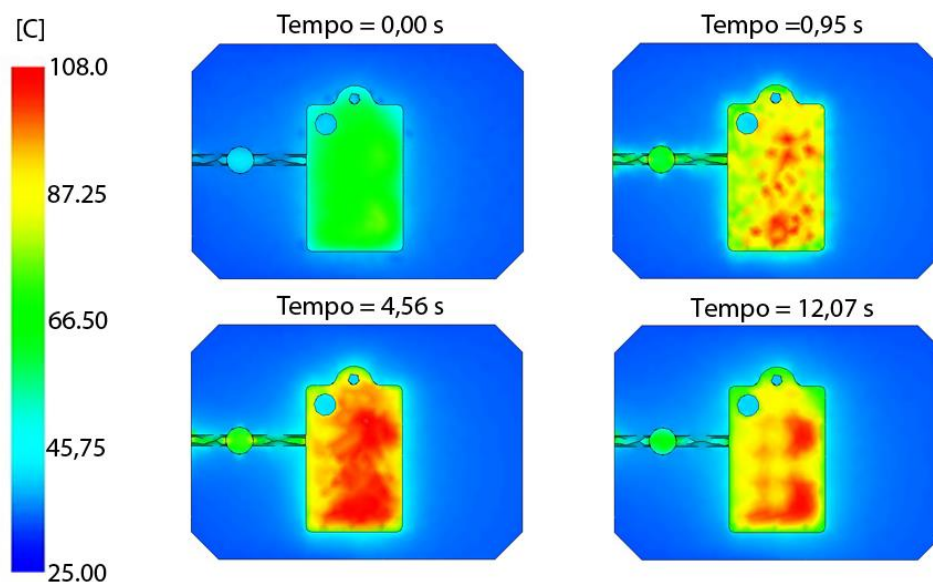


Figura 5. Distribuição de temperatura no inserto durante o ciclo de injeção.

Visualizando a Fig. (5) é possível verificar no final da injeção não é o ponto em que a temperatura atinge o pico, apesar de neste ponto a temperatura do injetado ser a mais próxima a temperatura de injeção. Devido à baixa transferência de calor do ABS, somente após mais de 3 segundos o inserto atinge os maiores valores de temperatura.

Com base nas distribuições de temperatura, a mesma pôde ser avaliada no ponto que apresentou maior temperatura durante o ciclo de injeção. Estes valores de temperatura puderam ser comparados com a temperatura obtida no ponto do termopar e a transição vítrea do inserto. Os pontos de captação da temperatura estão apontados na Fig. (6).

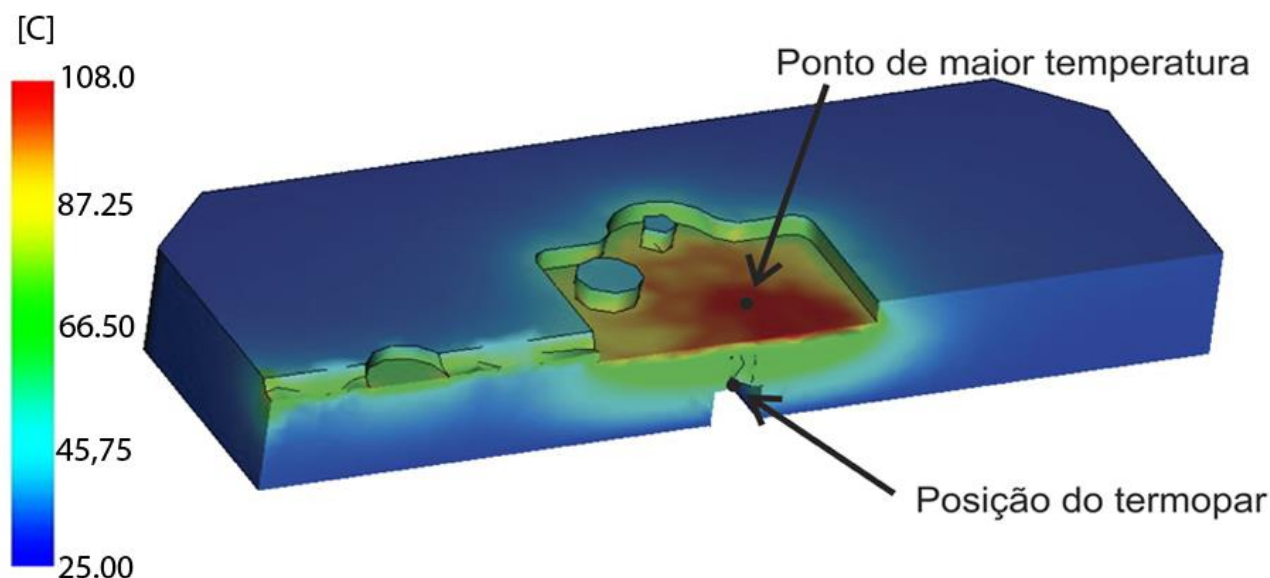
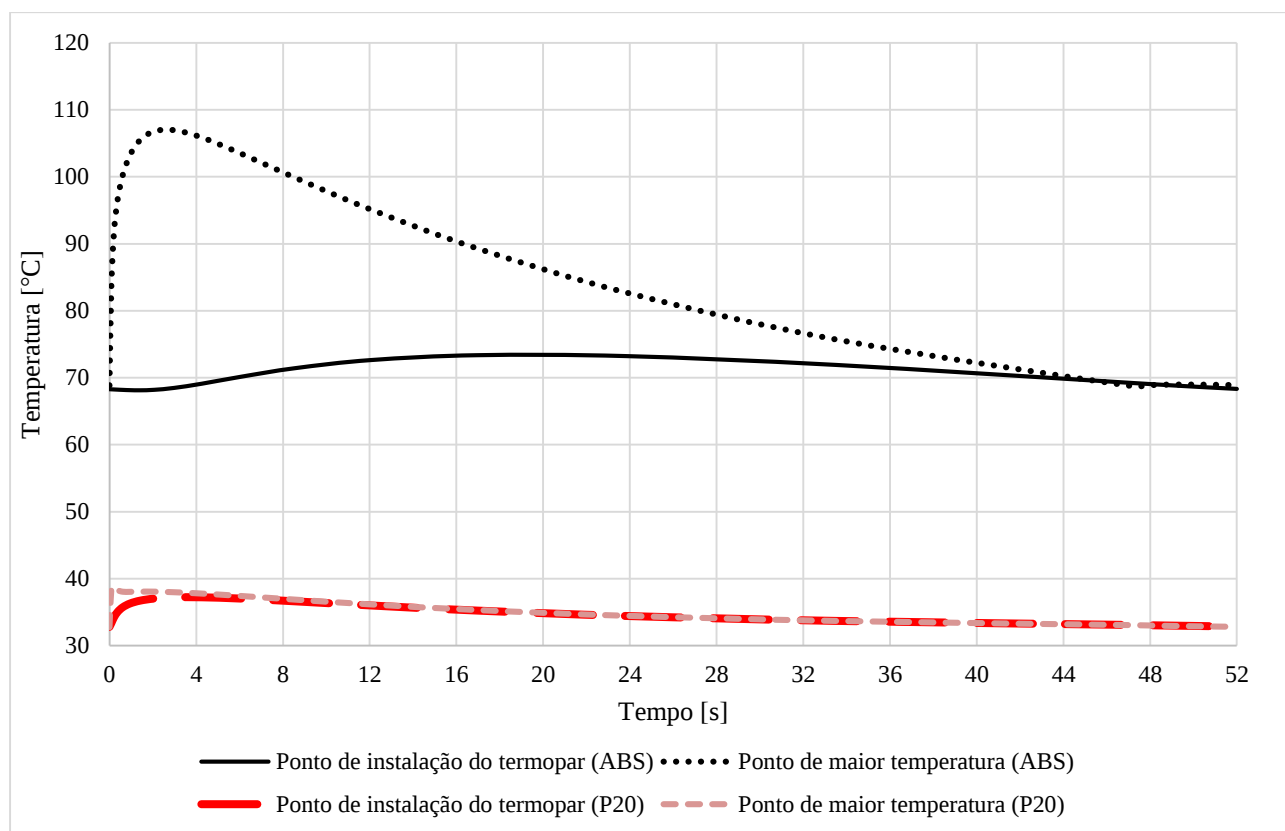


Figura 6. Pontos de captação da temperatura.

Na Fig. (7) pode-se observar as temperaturas obtidas no ponto de maior temperatura e no termopar, para os insertos de ABS e de aço.

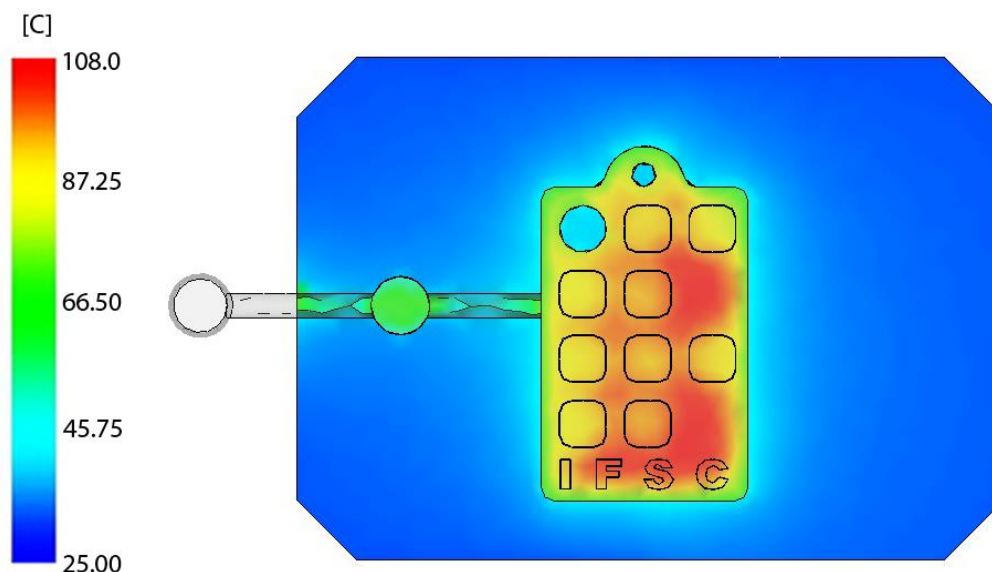


**Figura 7. Dados de temperatura transiente durante um ciclo.**

Avaliando o 75º ciclo para ambos os insertos, a Fig. (7) reforça o já exposto na Fig. (5). Há um atraso no aumento da temperatura do molde híbrido devido à menor difusividade térmica do material.

No caso do inserto de aço, a temperatura é máxima já na injeção do polímero, e a temperatura apresentada no ponto do termopar atinge seu ápice pouco mais de 3 segundos após a injeção, enquanto no ABS isto ocorre apenas 20 segundos após o fim da injeção.

Visto que o fluído entra em alta temperatura pelo canal, é esperado que este ponto possua maior temperatura. Porém, como observando a Fig. (5) é possível perceber que o ponto de maior temperatura se concentra à direita, longe do canal de alimentação. A Fig. (8) apresenta a temperatura do molde 8,562 segundos após o início da injeção, com a sobreposição do formato do produto na peça.

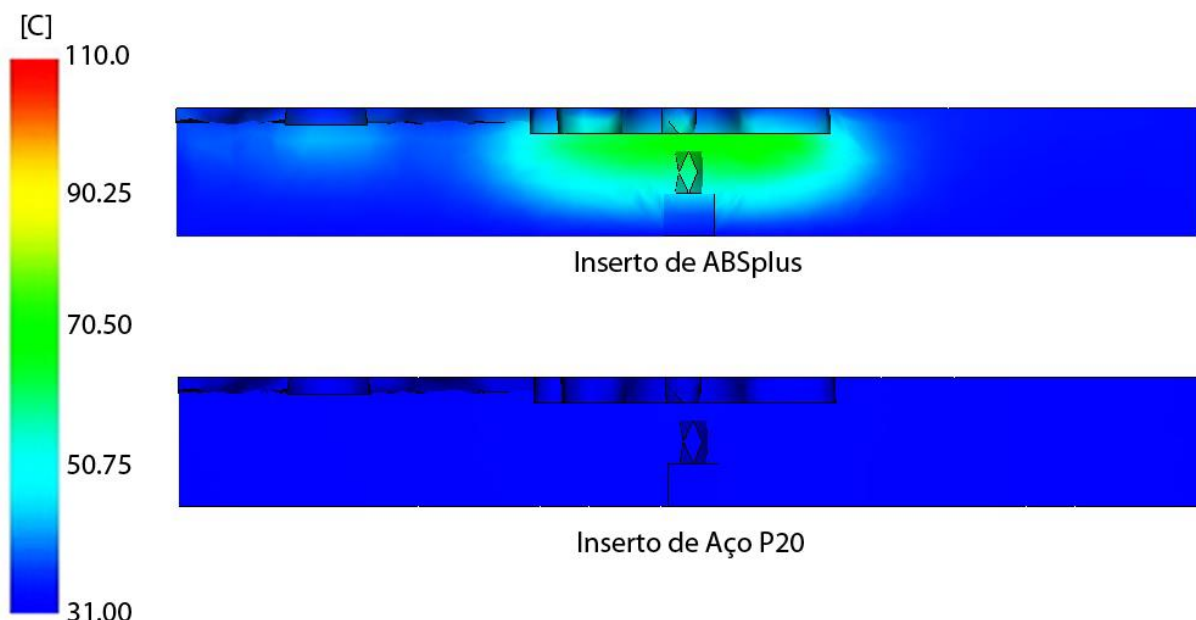


**Figura 8. Distribuição de temperatura no inserto.**

Analisando a Fig. (8), fica claro que a região mais quente é a qual o injetado apresenta a maior espessura. A definição das regiões com maiores temperaturas mostra-se muito importante ainda para o estabelecimento dos melhores locais para os canais de refrigeração, evitando problemas de empenamento e contração.

Nesta região, a maior massa de polímero acarreta em uma maior quantidade de energia acumulada, que é transmitida para o inserto por condução. Por consequência o maior fluxo de calor acarreta em uma maior temperatura na região em avaliação. Desta forma, peças com maior espessura requerem uma melhor remoção de calor que peças finas.

A Fig. (9) compara os insertos de aço e ABS no final do ciclo. Na imagem as peças foram seccionadas na região do canal de alimentação.



**Figura 9. Comparação da distribuição de temperatura nos insertos de aço e de ABS.**

Na Fig. (9) fica claro que o inserto de ABS retém uma quantidade significativa de energia no inserto. Este evento é explicado pela sua menor condutividade e alto calor específico que contribuem para uma difusividade térmica 1000 vezes menor que o aço. Ao fim do ciclo de 52 segundos, o molde de aço conseguiu manter uma temperatura homogenia em todo o inserto, enquanto o inserto de ABS apresentou uma região de alta temperatura.

A incapacidade de dissipar este calor prejudica o próximo ciclo, visto que o molde já se encontra mais quente nesta região, dificultando a troca térmica entre a peça e o inserto.

#### 4. CONCLUSÕES

Conclui-se com este trabalho que a simulação representou bem a realidade, salvo as aproximações realizadas pelo modelo. Desta forma, uma melhor avaliação de parâmetros térmicos do inserto pode contribuir para a melhora dos resultados.

O uso de insertos poliméricos compromete a produtividade, visto que o material polimérico apresenta difusividade térmica inferior a mesma propriedade em materiais metálicos. A baixa difusividade compromete a condução do calor proveniente do injetado para fora do molde. Devido a estes fatores regiões de alta temperatura podem ser formadas, propiciando a degradação do molde e deformação dos injetados.

Peças com maior espessura requerem maior cuidado para o uso de moldes híbridos, visto que estas inserem maior calor ao molde, comprometendo ainda mais a sua durabilidade. O uso de moldes híbridos fica restrito portanto a pequenos lotes de peças que não necessitem de ciclos rápidos de injeção.

O uso de refrigeração deve ser avaliado em trabalhos futuros visando contornar as dificuldades apresentadas nesta avaliação. Apesar da baixa condutividade térmica do material, a região de maior concentração de energia pode ter o calor removido com um sistema de refrigeração *conformal cooling*, o qual é capaz de contornar a superfície da peça injetada. A análise de distribuição de temperatura no molde pode ser usada para definir os melhores locais para a implantação dos canais de refrigeração, levando em conta as maiores concentrações de temperatura.

O uso de aditivos no material do inserto é outro ponto a ser avaliado de modo a facilitar a condutividade do calor do injetado aos canais de refrigeração ou ao meio externo.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de pesquisa.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Atre, S.V., Park, S. J., Zauner, R. e German, R. M. 2013, "Process simulation of powder injection moulding: identification of significant parameters during mould filling phase", Powder Metallurgy, Vol. 50, pp. 76-85.
- Dang, X.P., 2014, "General frameworks for optimization of plastic injection molding process parameters", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 41, pp. 15-27.
- Fernandes, A.C., Leite, J. L., Souza, A. F. e Pontes, A. J. V. 2013, "Análise microestrutural de peças de polipropileno injetadas em insertos a base de resina epóxi/alumínio", Anais do 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Penedo, Itatiaia, Brazil.
- Franchetti, M. e Kress, C. 2016, "An economic analysis comparing the cost feasibility of replacing injection molding processes with emerging additive manufacturing techniques", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 170, pp. 1-7.
- Hurst, P. 2014. Faster to market: Polyjet is a game changer for accelerating injection-molded products to market. Stratasys. Estudo de caso. Disponível em <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/commercial-products/whale> Acesso em: 15 de setembro de 2016.
- Jiang, J., Wang, S., Sun, B., Shuaijiang, M., Zhang, J, Li, Q. e Hu, G. 2015, "Effect of mold temperature on the structures and mechanical properties of micro-injection molded polypropylene", Materials and Design, Vol. 88, pp. 245-251.
- Lidomar, B., Miranda, J. R., Balzer, P. S., Howart, J. L. L. e Souza, A. F. 2013, "Instrumentação de moldes, sensores e simulação de temperatura no processo de injeção de termoplásticos", Anais do 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Vol. 1, Penedo, Itatiaia, Brazil.
- Lin, X., Caton-Rose, F., Ren, D., Wang, K. e Coates, P. 2013, "Shear-induced crystallization morphology and mechanical property of high density polyethylene in micro-injection molding", Journal of Polymer Research, Vol. 20, N°4, pp. 1-12.
- Marques, S., Souza, A. F., Miranda, J. e Yadroitsau, I. 2015, "Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation", Polímeros, Vol. 6, pp. 564-574.
- Martinho, P.G., Bártolo, P.G. e Pouzada, A. S. 2009 "Hybrid moulds: effect of the moulding blocks on the morphology and dimensional properties", Rapid Prototyping Journal, Vol. 15, pp. 71-82.
- Pradella, M.P. e Folle, L.F., 2014, "Análise de mercado sobre tecnologias de prototipagem rápida por adição de material", Anais do 11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, N°4, Vol. 1, Gramado, Brazil.
- Rajaguru, J., Duke, M. e Au, C., 2015, "Development of rapid tooling by rapid prototyping technology and electroless nickel plating for low-volume production of plastic parts", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 78, pp. 31-40.
- Rosato, V.D., 1995, "Injection Molding Handbook", New York: Chapman & Hall.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# THERMAL PERFORMANCE ANALYSIS OF POLYMERIC INSERT THROUGH INSTRUMENTATION AND SIMULATION

Maikol Funk Drechsler, [maikol.f.drechsler@grad.ufsc.br](mailto:maikol.f.drechsler@grad.ufsc.br)<sup>1</sup>

Carlos Mauricio Sacchelli, [carlos.sacchelli@ufsc.br](mailto:carlos.sacchelli@ufsc.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Santa Catarina, Dr. João Colin street, 2700, Santo Antônio. Joinville – SC – Brasil

**Abstract:** *The minor manufacturing time and cost is motivating the rapid tools use to the mold fabrication with alternative materials like resins and polymers. But this technology type find barriers in your poor thermal proprieties that difficult the thermal change between injected part and the surroundings. The different heat ratios still contribute for crystallinity change and consequently the final mechanical proprieties. Thus, the general purpose of this work consist in define how the different thermal proprieties of the polymeric insert can interfere in your performance during the injection cycles. For the analyses the mold was instrumented for the punctual evaluation of the temperature during the time and the process was simulated in CAE software. The real and simulated data was compered in transient regime and the temperature distribution in the insert was analyzed through the Moldflow® software. The results show that the simulation had a good representation of reality, but due to idealization and approximation of the data, the values are not identical. Concludes, based on simulation, that due to the low thermal diffusivity of the insert, inject parts with big thickness need to be avoided and that for this mold type it is likely the occurrence of a heat accumulation region.*

**Key-words:** *Adjective Manufacturing, Fusion and Deposition Modeling, Injection mold.*